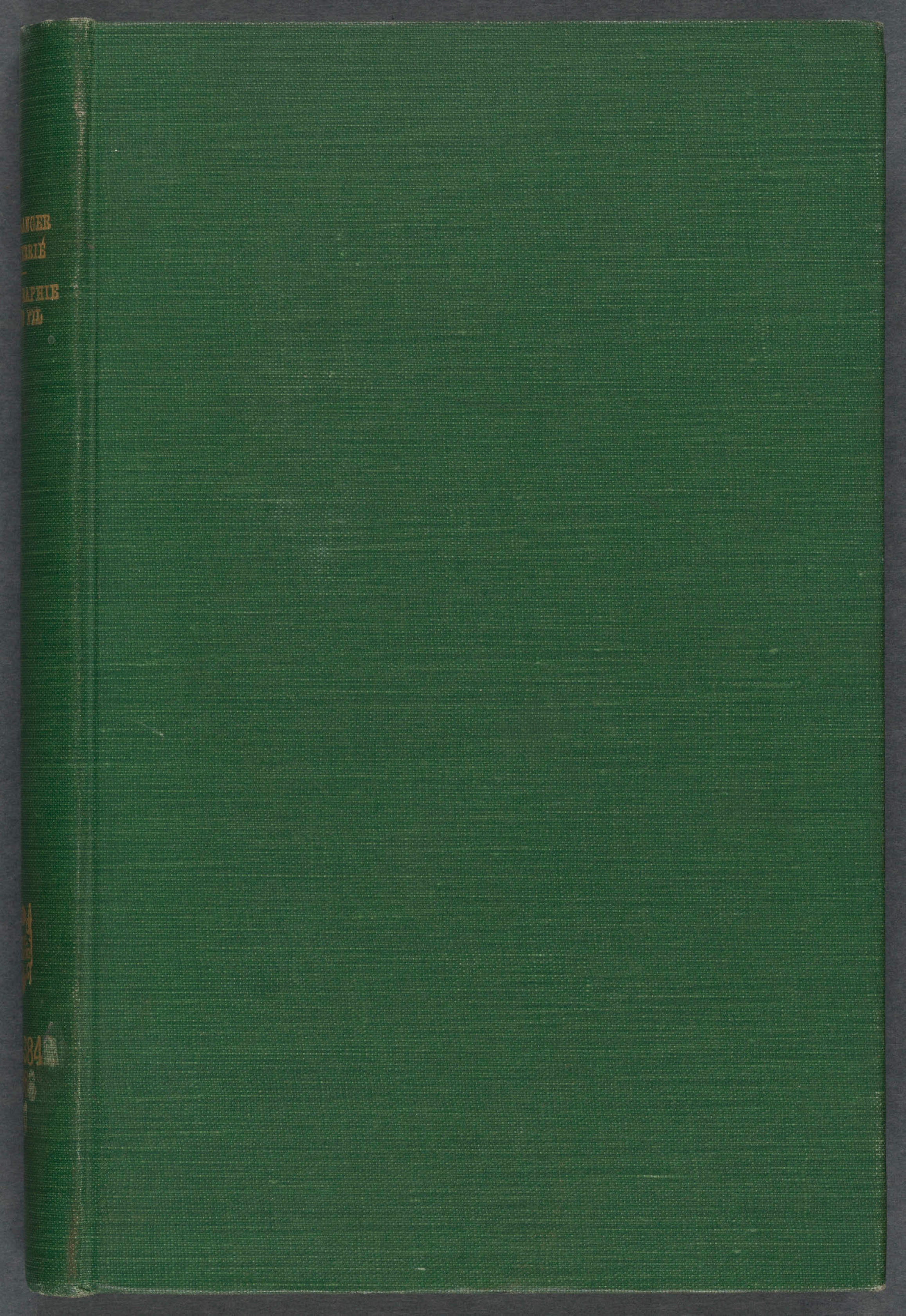
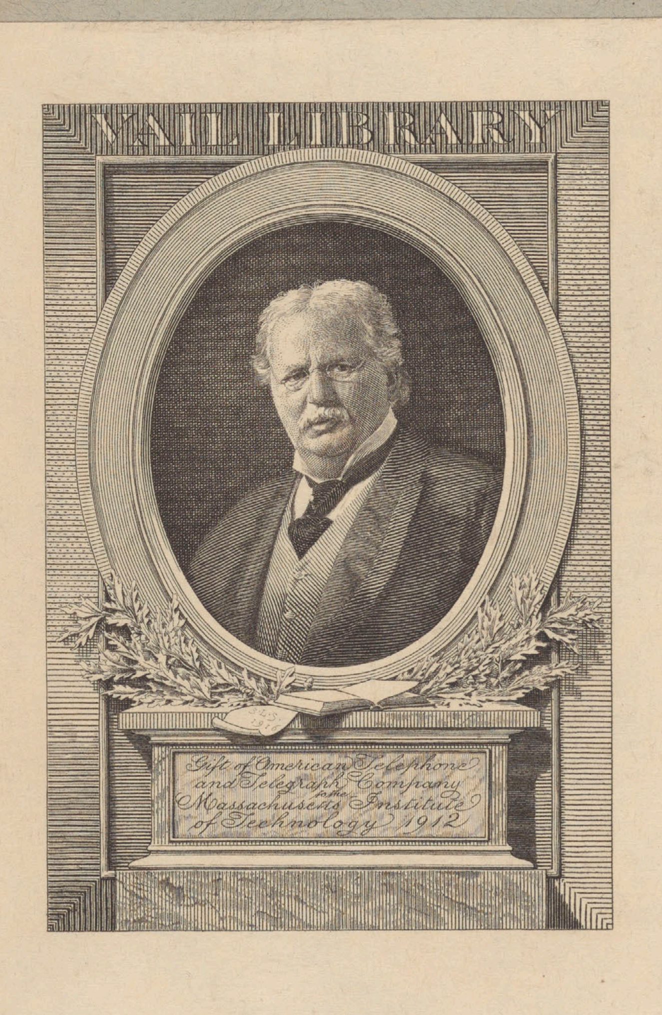




VAIL LIBRARY
Gift of American Telephone
and Telegraph Company
to the
Massachusetts Institute
of Technology 1912

LA

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

ET LES

ONDES ÉLECTRIQUES

LA
TÉLÉGRAPHIE SANS FIL
ET LES
ONDES ÉLECTRIQUES

PAR

J. BOULANGER
COLONEL DU GÉNIE

G. FERRIÉ
CAPITAINE DU GÉNIE

SIXIÈME ÉDITION, AUGMENTÉE ET MISE A JOUR

AVEC 181 FIGURES DANS LE TEXTE



BERGER-LEVRAULT ET Cie, ÉDITEURS
PARIS
5, rue des Beaux-Arts, 5
NANCY
18, rue des Glacis, 18
1907

AVERTISSEMENT

Bien que cette sixième édition présente avec les précédentes des différences notables, elle n'est malheureusement pas encore une œuvre complète. Un certain nombre de questions importantes n'y sont qu'effleurées : l'amortissement, les accouplements, les oscillations entretenues, les résonances, etc.

A la vérité, d'importants travaux ont été publiés sur toutes ces questions ; cependant il ne nous a pas paru qu'elles fussent suffisamment étudiées, au point de vue pratique tout au moins, pour pouvoir être présentées d'une manière complète en vue des applications. Les progrès scientifiques sont tellement rapides, néanmoins, que l'on peut espérer combler ces lacunes dans un avenir peu éloigné.

Comme dans les éditions précédentes, nous nous sommes efforcés d'éviter les développements inutiles de spéculation pure en cherchant à ne donner que des faits précis, appuyés sur l'expérience et classés de manière à constituer un guide pour l'ingénieur ou pour l'opérateur averti.

Il nous a paru utile d'ajouter à la partie technique les documents administratifs qu'il est indispensable de connaître pour procéder à des études d'installation. C'est d'abord la convention de Berlin et le

Règlement international de 1906, bien qu'à la vérité ces documents n'aient pas encore été ratifiés. Nous y avons joint le texte du décret du 5 mars 1907 et enfin une liste des stations radiotélégraphiques existant dans le monde entier.

Nous devons ce dernier document à l'extrême obligeance de M. le commandant Barber, de la marine des États-Unis, spécialiste éminent, auquel nous adressons tous nos remerciements.

LA

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

ET LES

ONDES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE I

THÉORIE DE MAXWELL

Lorsqu'on se reporte à l'histoire des grandes découvertes scientifiques, on reconnaît que, bien souvent, elles sont dues au hasard. Cela est vrai surtout pour les plus anciennes et cela explique en même temps leur rareté. Car, outre le concours fortuit des circonstances nécessaires à la production d'un phénomène déterminé, il fallait encore la présence d'un observateur de génie pour remarquer ce phénomène et en déduire des conséquences. C'est par hasard qu'un préparateur prit un jour un fil de cuivre pour suspendre des pattes de grenouille à un balcon de fer; c'est aussi par hasard que le vent vint fermer le circuit et produire les contractions ; mais ces hasards, qui ont eu comme conséquence la découverte de la pile électrique, eussent été inutiles sans la présence de Galvani.

Aujourd'hui, il n'en est pas toujours ainsi ; au lieu de

commencer par la découverte du fait brutal, pour chercher ensuite à établir une théorie qui l'explique, la science procède quelquefois d'une façon inverse et, d'une théorie paraissant n'avoir tout d'abord qu'un intérêt purement spéculatif, fait surgir tout à coup un phénomène nouveau susceptible d'applications importantes.

C'est ainsi que les formules établies par Fresnel sur la polarisation de la lumière ont conduit à la découverte du champ tournant de Ferraris, dont l'application aux moteurs électriques se répand tous les jours.

La télégraphie sans fil en est un nouvel exemple, car son origine se trouve dans les idées purement théoriques émises par Clerk Maxwell sur la nature des phénomènes électriques et magnétiques.

Il ne s'agit ici que du système de télégraphie basé sur l'emploi des ondes électriques ou ondes *hertziennes,* auquel on réserve plus particulièrement le nom de télégraphie sans fil, bien que d'autres systèmes permettent également l'échange de signaux télégraphiques entre deux stations, sans que celles-ci soient reliées par un conducteur métallique. Tels sont, par exemple, les systèmes basés sur l'emploi des signaux optiques, comme l'ancien télégraphe aérien de Chappe et la télégraphie optique actuelle, ou bien ceux qui utilisent soit la conductibilité du sol, soit les phénomènes d'induction à distance.

La télégraphie sans fil, définie comme nous venons de le dire, ayant son point de départ dans la théorie de Maxwell, nous avons dû commencer par résumer les principaux points de cette théorie; nous montrerons ensuite comment des expériences successives, faites en vue de la vérifier, ont conduit à la télégraphie sans fil.

Le physicien anglais Clerk Maxwell, né en 1831, mort en 1879, était un élève de Faraday. Comme lui, il rejetait l'idée des actions à distance, qui est en effet une de celles que l'esprit se refuse à admettre; autant il est facile de

concevoir des actions se propageant de proche en proche, dans un milieu, par des déformations successives de ce milieu, autant il est difficile d'admettre que deux corps puissent agir à distance l'un sur l'autre sans l'intervention du milieu interposé. La loi newtonienne n'implique pas d'ailleurs la réalité d'actions à distance et Newton lui-même disait :

« Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre corps à distance, à travers le vide et sans aucun autre intermédiaire, c'est pour moi une si grande absurdité qu'il me semble impossible qu'un homme capable de traiter des matières philosophiques puisse jamais y tomber [1]. »

Maxwell ne voyait donc dans les phénomènes électriques et magnétiques que des déformations du milieu interposé. Un nouveau fait expérimental vint confirmer ces idées d'une manière inattendue et fut ainsi le point de départ d'une théorie englobant à la fois l'électricité, le magnétisme et la lumière.

Ce fait fut la valeur que donnait l'expérience pour le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques. Nous rappellerons d'abord en quoi consiste ce rapport.

On sait que toutes les grandeurs électriques ou magnétiques peuvent être rattachées aux grandeurs mécaniques, de telle sorte qu'on peut les mesurer sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à d'autres unités arbitraires que les trois unités fondamentales de la mécanique, longueur, masse et temps. C'est le principe du système C G S (centimètre, masse du gramme, seconde).

Toutefois, ce rattachement peut se faire de plusieurs manières, qui donnent lieu à autant de systèmes d'unités différents.

Considérons les trois grandeurs suivantes : une quantité d'électricité Q, un pôle magnétique ayant une quantité de

1. Lettre de Newton à Bentley, du 25 février 1691.

magnétisme q et un courant d'intensité i, que nous supposerons d'abord évaluées au moyen d'unités arbitraires. On a entre les nombres Q, q et i les relations ci-après.

La masse Q étant placée à une distance r d'une masse identique, il s'exerce entre ces masses une action f qui, d'après la loi de Coulomb, est :

$$f = K \frac{Q^2}{r^2}. \qquad (1)$$

De même, la loi de Coulomb relative aux actions magnétiques nous donne :

$$f' = K' \frac{q^2}{r^2}. \qquad (2)$$

Quant à l'intensité du courant i, on sait qu'elle représente la quantité d'électricité qui traverse une section du conducteur pendant l'unité de temps. Si t est le temps nécessaire au passage de la quantité Q, on a :

$$Q = it. \qquad (3)$$

Enfin, une dernière relation est fournie par la loi de Laplace. Plaçons le pôle magnétique q au centre d'un conducteur circulaire de rayon r, parcouru par le courant i, l'action exercée par un arc de ce conducteur ayant une longueur S est :

$$f'' = K'' \frac{qiS}{r^2}. \qquad (4)$$

Éliminant Q, q et i entre les quatre équations ci-dessus, il vient :

$$\frac{\sqrt{ff'}}{f''} \frac{S}{t} = \frac{\sqrt{KK'}}{K''}. \qquad (5)$$

On sait que les coefficients K, K', K'' dépendent de la nature du milieu dans lequel se passent les actions. Si ce milieu est invariable, on peut les considérer comme de

simples coefficients de proportionnalité purement numériques, dont la valeur ne dépend plus que des unités choisies pour mesurer Q, q et i.

Toutefois, si nous posons :

$$\frac{\sqrt{KK'}}{K''} = u, \tag{6}$$

l'équation (5) nous montre que, pour un milieu donné, le nombre u est indépendant des unités électriques et magnétiques. Le premier membre, en effet, ne contient que des grandeurs mécaniques et en particulier ne dépend que de l'unité de vitesse. Si, au contraire, le milieu venait à changer, les actions f, f', f'' ne seraient plus les mêmes et le nombre u prendrait une autre valeur. On peut donc le considérer comme caractéristique du milieu où se passent les actions.

Supposons, pour fixer les idées, que ce milieu soit l'air ; on peut alors débarrasser les calculs de deux des coefficients en les égalant à l'unité.

Dans le système électrostatique, on convient de faire :

$$K = 1, \qquad K'' = 1.$$

L'unité de quantité d'électricité est alors déduite de la relation (1) ; c'est la quantité qui, placée à l'unité de distance d'une masse égale, produit sur elle une action égale à l'unité de force.

L'unité d'intensité, déduite de (3), est l'intensité d'un courant tel qu'une section du conducteur soit traversée par l'unité de quantité d'électricité pendant l'unité de temps.

Quant à l'unité de quantité de magnétisme, elle se déduit de la relation (4) ; c'est celle d'un pôle qui, placé au centre d'un arc de cercle de longueur égale à 1 et parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité, subit une action égale à l'unité de force.

On voit que, dans ce système, le coefficient K' de la

relation (2) doit être maintenu. Mais, comme l'unité de quantité de magnétisme et par suite la valeur du nombre q sont déterminées, il faut lui donner une valeur K'_e telle que l'équation (2) soit satisfaite.

D'autre part, l'équation (6) étant également satisfaite quelles que soient les unités, si l'on fait :

$$K = 1, \qquad K' = K'_e, \qquad K'' = 1,$$

il vient :

$$K'_e = u^2.$$

Dans le système électromagnétique, on se donne :

$$K' = 1, \qquad K'' = 1,$$

c'est-à-dire que l'unité de quantité de magnétisme est déduite de la relation (2). C'est celle qui, placée à l'unité de distance d'une quantité égale, exerce sur elle une action égale à l'unité de force.

L'unité d'intensité de courant est alors déduite de (4). C'est l'intensité d'un courant qui, traversant un arc de cercle de rayon 1 et de longueur égale à 1, produit sur l'unité de masse magnétique placée au centre du cercle une action égale à l'unité de force.

La relation (3) nous donnera, pour l'unité de quantité d'électricité, la quantité qui, pendant l'unité de temps, traverse une section d'un conducteur, lorsque ce conducteur est parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité.

Si enfin on considère l'équation (1), on voit que, le nombre Q étant déterminé par la définition qui précède, cette équation n'est satisfaite qu'à la condition de donner à K une valeur déterminée K_m.

En faisant, dans l'équation (6) :

$$K = K_m, \qquad K' = 1, \qquad K'' = 1,$$

il vient :

$$K_m = u^2.$$

Les deux systèmes étant ainsi définis, supposons qu'une même grandeur, une certaine quantité d'électricité, par exemple, soit mesurée successivement dans chacun d'eux. On obtiendra ainsi deux nombres Q_s et Q_m dont le rapport sera d'ailleurs l'inverse du rapport des unités correspondantes.

D'après ce qui précède, on aura :

$$f = \frac{Q_s^2}{r^2} = K_m \frac{Q^2_m}{r^2} = u^2 \frac{Q_m^2}{r^2}.$$

De même l'équation (2), appliquée successivement aux deux systèmes, donnerait :

$$f' = u^2 \frac{q_s^2}{r^2} = \frac{q^2_m}{r^2}.$$

Pour l'équation (3) on aura :

$$Q_s = i_s t, \qquad Q_m = i_m t;$$

et enfin, pour l'équation (4) :

$$f'' = \frac{q_s i_s S}{r^2} = \frac{q_m i_m S}{r^2}.$$

Si, d'une manière générale, on désigne par le symbole [Q] l'unité qui sert à évaluer une grandeur Q, on déduira des équations précédentes :

$$\frac{[Q_m]}{[Q_s]} = \frac{[i_m]}{[i_s]} = \frac{[q_s]}{[q_m]} = u.$$

Des expériences nombreuses ont été faites pour la mesure de u, soit en variant les méthodes de mesure, soit en opérant sur des grandeurs différentes. Les résultats ont été sensiblement concordants et donnent en moyenne : $u = 3 \times 10^{10}$.

Si l'on remarque que les unités sont rapportées au sys-

tème CGS, qui comporte le centimètre comme unité de longueur et la seconde comme unité de temps, on voit que le rapport *u* est égal numériquement à la vitesse de la lumière, qui est de 300 000 km par seconde.

Maxwell se demanda alors si cette coïncidence était purement fortuite, ou bien s'il fallait au contraire y voir une conséquence de la théorie. Il fut ainsi amené à rechercher si, en précisant les idées de Faraday et en les traduisant en langage mathématique, il était possible de déduire, des équations, une théorie expliquant tous les phénomènes connus, y compris la valeur que l'expérience assignait au nombre *u*.

Considérons un condensateur formé de deux armatures planes A et B, séparées par une lame d'air (fig. 1). Le condensateur étant chargé, si l'on vient à réunir ses armatures par un conducteur *amb*, celui-ci est le siège d'un courant de faible durée et le condensateur se décharge.

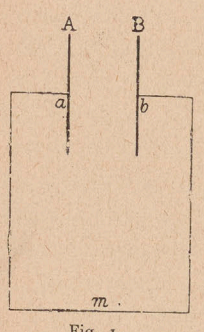


Fig. 1.

Or, de nombreuses expériences ont démontré que le phénomène de la décharge ne se réduit pas seulement à ce courant, mais que le diélectrique qui sépare les armatures du condensateur doit également y jouer un rôle. Aucune des anciennes théories n'avait défini ce rôle ni précisé la nature des phénomènes qui se passent dans le diélectrique pendant la décharge.

Pour Maxwell, ces phénomènes ne sont autre chose que des courants. D'après les anciennes idées, la présence d'un corps conducteur était considérée comme indispensable à la production d'un courant. Lorsque le circuit avait, comme le fil *amb*, ses extrémités isolées l'une de l'autre, ce circuit était dit *ouvert* et le courant n'avait que la faible durée nécessaire au rétablissement de l'équilibre électrostatique dans le conducteur.

D'après les idées de Maxwell, au contraire, les courants sont toujours *fermés* et, dans le cas ci-dessus, on doit considérer le circuit comme se complétant par le diélectrique qui sépare A et B, lequel est alors le siège de courants, tout aussi bien que la portion conductrice *amb*.

Toutefois, Maxwell admet que les courants n'ont pas la même nature dans les deux cas. Cela tient à ce que, si tous les corps opposent une résistance au passage de l'électricité, cette résistance n'est pas la même suivant que l'on a affaire à un diélectrique ou à un conducteur. L'exemple suivant permet de saisir facilement cette différence (1).

Quand on bande un ressort, on rencontre une résistance croissante qui finit par faire équilibre à l'effort exercé. Lorsque la force cesse d'agir, le ressort restitue le travail dépensé pour le déformer.

Supposons maintenant que l'on déplace un corps dans l'eau, on éprouve encore une résistance qui dépend de la vitesse du déplacement, mais qui ne varie pas tant que cette vitesse reste constante. Le mouvement se prolonge tant que dure la force agissante ; mais si cette force cesse, le corps ne tend pas à revenir en arrière et tout le travail fourni a été transformé en chaleur par la viscosité de l'eau.

Il faut donc distinguer entre ce que l'on pourrait appeler la résistance *élastique* et la résistance *visqueuse*. La première caractérise les diélectriques, tandis que les conducteurs présentent la seconde.

D'où deux catégories de courants : dans les diélectriqués, les particules électriques ne peuvent se déplacer que d'une petite quantité, variable suivant la nature du corps. Le mouvement de l'électricité se trouvant arrêté au bout d'un temps très court par la réaction élastique,

---

1. H. Poincaré, *Annuaire du Bureau des longitudes*, 1894 (notice A).

on ne peut avoir que des courants de faible durée, que Maxwell nomme courants de *déplacement*. En d'autres termes, les choses se passent dans le diélectrique comme si les courants de déplacement avaient pour effet de bander une foule de petits ressorts. Ces courants cessent lorsque l'équilibre électrostatique est établi. Le travail accumulé, qui est l'énergie électrostatique, est restitué quand les ressorts peuvent se débander, c'est-à-dire lorsqu'on laisse les conducteurs obéir aux actions électrostatiques. Si la limite d'élasticité est dépassée, les ressorts se brisent et l'on a le phénomène de la décharge disruptive.

Par suite, en chaque point d'un champ électrique, l'intensité H de ce champ n'est autre chose que la réaction élastique des particules d'électricité qui ont été écartées de leurs positions primitives.

Dans les conducteurs, au contraire, l'électricité peut se déplacer à travers toute la masse, sans rencontrer d'autre obstacle qu'une résistance analogue au frottement. On a alors un courant dit de *conduction*, qui dure aussi longtemps que la force électromotrice qui lui donne naissance. Le travail fourni n'est pas, comme dans le cas précédent, emmagasiné sous forme d'énergie potentielle et il se retrouve dans le conducteur, sous forme de chaleur.

D'après ce qui précède, on doit, avec Maxwell, admettre l'unité de force électrique ; c'est-à-dire que la cause qui, dans un diélectrique, donne naissance à des courants de déplacement est la même qui, sous le nom de force électromotrice, produit des courants de conduction, lorsqu'elle agit dans un corps conducteur.

Enfin, bien que la nature des deux sortes de courants ne soit pas la même, Maxwell admet encore que leurs propriétés sont identiques et qu'un courant de déplacement doit produire un champ magnétique identique au champ magnétique produit par un courant de conduc-

tion, lequel est lui-même identique au champ magnétique produit par un aimant.

Il en résulte que le champ électrique et le champ magnétique sont inséparables. Leur superposition constitue ce que Maxwell nomme le champ *électromagnétique*.

Une perturbation électrique ou magnétique se traduira donc toujours par un courant. Dans un milieu diélectrique indéfini, ce courant produira, par induction dans son voisinage, des courants de déplacement qui agiront à leur tour sur les éléments voisins, de sorte que la perturbation se propagera de proche en proche avec une vitesse finie, sous la forme d'une onde analogue aux ondes du son et de la lumière.

Nous allons voir comment la traduction mathématique

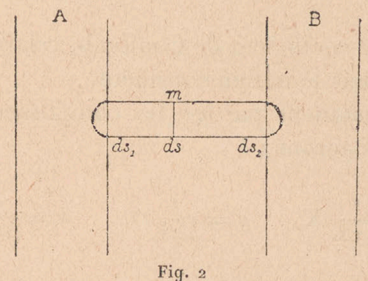


Fig. 2

des hypothèses de Maxwell permet de calculer cette vitesse. Lorsque la perturbation atteint un point de l'espace, que nous supposerons d'abord dans un diélectrique, elle y produit un champ électrique; soit H l'intensité de ce champ au point considéré m et XYZ ses composantes suivant trois axes rectangulaires. Considérons un tube de force passant en m (fig. 2) et soit ds sa section en ce point. On sait que ce tube de force doit forcément être limité par deux corps conducteurs tels que A et B, sur lesquels il découpe des éléments ds_1 ds_2 appelés éléments correspondants. De plus, les charges sur ds_1 et ds_2 sont égales en valeur absolue : soit Q cette valeur; on admet-

tra que les déplacements des couches électriques se sont effectués dans le sens des lignes de force, chaque section du tube ayant été traversée par une même quantité d'électricité Q. Maxwell définit alors le déplacement au point m par cette quantité $\frac{Q}{ds}$, rapportée à l'unité de surface.

D'autre part, le flux de force qui traverse l'élément ds étant Hds, on a la relation :

$$Hds = 4\pi KQ;$$

ce qui donne pour le déplacement :

$$\frac{Q}{ds} = \frac{H}{4\pi K};$$

K est alors le coefficient de Coulomb, relatif aux actions électriques dans le milieu considéré.

Si nous désignons par fgh les composantes du déplacement, nous aurons :

$$f = \frac{1}{4\pi K}X, \quad g = \frac{1}{4\pi K}Y, \quad h = \frac{1}{4\pi K}Z.$$

Pendant son déplacement, la quantité d'électricité Q a produit un courant dont la densité, ou l'intensité par unité de surface, est représentée par la quantité qui traverse l'unité de surface pendant l'unité de temps, c'est-à-dire par $\frac{1}{4\pi K}\frac{dH}{dt}$.

Si nous désignons par abc les composantes de cette densité du courant de déplacement, nous aurons :

$$a = \frac{1}{4\pi K}\frac{dX}{dt}, \quad b = \frac{1}{4\pi K}\frac{dY}{dt}, \quad c = \frac{1}{4\pi K}\frac{dZ}{dt}. \quad (7)$$

Supposons maintenant qu'au lieu d'un diélectrique caractérisé par le coefficient K, nous ayons en m un mi-

lieu de conductibilité C : le courant de déplacement sera remplacé par un courant de conduction obéissant à la loi d'Ohm. Soient α, β, γ les composantes de ce courant rapporté à l'unité de surface et considérons l'élément de volume $dx\ dy\ dz$, placé en m (fig. 3).

Le courant qui traverse cet élément suivant mx est égal au produit de la composante α par la surface *mbec*, soit à $\alpha dydz$. D'autre part, d'après Maxwell, la force électromotrice qui produit ce courant est Xdx; de plus,

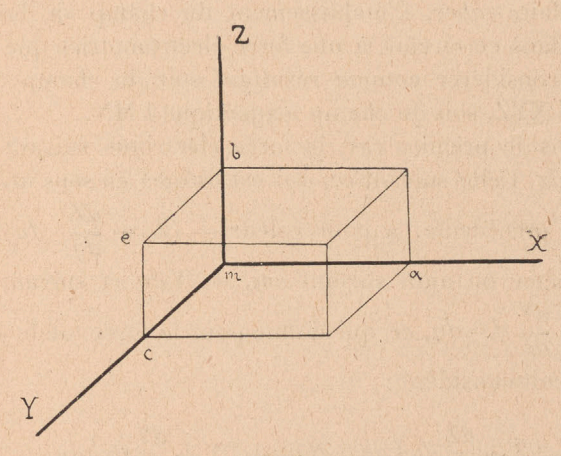


Fig. 3.

la résistance électrique du prisme ayant pour longueur *ma* et pour section *mbec* est $\frac{dx}{C dy dz}$. La loi d'Ohm donnera donc :

$$Xdx = \frac{dx}{C\,dy\,dz}\,\alpha\,dy\,dz$$

ou

$$\alpha = CX.$$

On a donc pour les trois composantes du courant de conduction :

$$\alpha = CX, \qquad \beta = CY, \qquad \gamma = CZ. \qquad (8)$$

Si enfin le milieu occupé par l'élément de volume est un isolant imparfait, on aura à la fois courant de déplacement et courant de conduction, c'est-à-dire un courant dont on pourra représenter les composantes par $a + \alpha$, $b + \beta$, $c + \gamma$.

D'après ce que nous avons dit ci-dessus, les courants produits en m donnent à leur tour naissance à un champ magnétique d'intensité H'. Soient LMN les composantes de H' suivant les trois axes et considérons le circuit rectangulaire *mbec*. L'établissement du champ va donner lieu, dans ce circuit, à une force électromotrice que l'on peut considérer comme résultant soit du champ électrique XYZ, soit du champ magnétique LMN.

Dans le premier cas, la force électrique suivant *mb* est $Z dz$. Celle suivant *ec*, qui est dirigée en sens inverse de la précédente, a pour valeur $-(Z + \frac{dZ}{dy} dy) dz$. De même on aura suivant *cm*, $-Y dy$ et suivant *be*, $(Y + \frac{dY}{dz} dz) dy$, ce qui donne pour la force totale dans le circuit considéré :

$$Z dz - \left(Z + \frac{dZ}{dy} dy\right) dz - Y dy + \left(Y + \frac{dY}{dz} dz\right) dy = \left(\frac{dY}{dz} - \frac{dZ}{dy}\right) dy\, dz.$$

Considérons maintenant cette force électromotrice comme une conséquence de l'établissement du champ magnétique H'. Le flux de force qui traverse le circuit *mbec* est $L dy dz$. La force électromotrice dans ce circuit est donc $-\frac{K''}{K'} \frac{dL}{dt} dy\, dz$ [1] et l'on aura, en appliquant le

1. K' est le coefficient de la formule de Coulomb relative aux actions magnétiques et K'' le coefficient de la formule de Laplace relative aux actions électromagnétiques.

même raisonnement aux trois composantes LMN :

$$\begin{aligned}\frac{K''}{K'}\frac{dL}{dt} &= \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz}\\ \frac{K''}{K'}\frac{dM}{dt} &= \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx} \qquad (9)\\ \frac{K''}{K'}\frac{dN}{dt} &= \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy}.\end{aligned}$$

On peut obtenir une autre série de relations entre les composantes du champ magnétique et celles du champ électrique. Pour cela, nous évaluerons le travail effectué par un pôle magnétique égal à l'unité, qui décrirait le circuit *mbec*. On sait que ce travail est égal au produit de $4\pi K''$ par l'intensité du courant dans le prisme $dx\,dy\,dz$, parallèlement à la direction *mx*, soit, dans le cas le plus général, à $4\pi K''(a + \alpha)\,dy\,dz$.

D'autre part, le même travail peut être évalué directement, en calculant le travail produit dans chacun des côtés du rectangle, par les composantes LMN du champ magnétique.

Pour le côté *mb*, le travail dû aux composantes L et M est nul et il ne reste que le travail dû à la composante N, qui est $N dz$.

Pour le côté *be*, le travail des composantes parallèles à *mx* et *mz* est nul ; la composante suivant *be* étant égale à $M + \frac{dM}{dz}dz$, le travail correspondant est $\left(M + \frac{dM}{dz}dz\right)dy$.

On trouvera de même pour le travail suivant *ec* : $\left(N + \frac{dN}{dy}dy\right)dz$ et pour le travail suivant *cm* : $M\,dy$.

Comme d'ailleurs les côtés *ec* et *cm* sont parcourus en sens inverses des côtés *mb* et *be*, on aura pour le travail total :

$$N\,dz + \left(M + \frac{dM}{dz}dz\right)dy - \left(N + \frac{dN}{dy}dy\right)dz - M\,dy$$
$$= \left(\frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy}\right)dy\,dz = 4\pi K''(a + \alpha)\,dy\,dz.$$

Remplaçant a et α par leurs valeurs données par les relations (7) et (8), on obtiendra pour les trois directions :

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy} &= \frac{K''}{K}\frac{dX}{dt} + 4\pi K'' CX \\ \frac{dN}{dx} - \frac{dL}{dz} &= \frac{K''}{K}\frac{dY}{dt} + 4\pi K'' CY \qquad (10) \\ \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx} &= \frac{K''}{K}\frac{dZ}{dt} + 4\pi K'' CZ. \end{aligned}$$

Supposons maintenant que l'onde étudiée soit assez éloignée de son point de départ pour qu'on puisse la considérer comme plane. Prenons le plan de l'onde pour plan des yz, la propagation se faisant alors suivant l'axe des x. Toutes les fonctions ne dépendant plus que des variables x et t, les autres dérivées sont nulles et les équations (9) deviennent :

$$\begin{aligned} \frac{K''}{K'}\frac{dL}{dt} &= 0 \\ \frac{K''}{K'}\frac{dM}{dt} &= -\frac{dZ}{dx} \\ \frac{K''}{K'}\frac{dN}{dt} &= \frac{dY}{dx}. \end{aligned}$$

Nous admettrons qu'il s'agit d'un diélectrique suffisamment isolant pour que l'on puisse négliger sa conductibilité. On fera donc $C = 0$, ce qui donnera pour les équations (10) :

$$\begin{aligned} \frac{K''}{K}\frac{dX}{dt} &= 0 \\ \frac{K''}{K}\frac{dY}{dt} &= \frac{dN}{dx} \\ \frac{K''}{K}\frac{dZ}{dt} &= -\frac{dM}{dx}. \end{aligned}$$

De ces relations et de celles qui précèdent, nous déduisons :

$$L = 0, \qquad X = 0,$$

ce qui montre que les forces magnétique et électrique

sont dans le plan de l'onde. Mais, si nous prenons comme axe des y la direction de la force magnétique, nous aurons en outre :

$$N = 0,$$

ce qui conduit à :

$$Y = 0.$$

Les deux forces sont alors représentées respectivement par les composantes M et Z ; elles sont à angle droit et transversales, c'est-à-dire dans un plan normal à la direction de propagation.

Les deux systèmes (9) et (10) se réduisent alors à :

$$\frac{K''}{K'}\frac{dM}{dt} = -\frac{dZ}{dx} \qquad (11)$$

$$\frac{K''}{K}\frac{dZ}{dt} = -\frac{dM}{dx}. \qquad (12)$$

Considérons maintenant l'onde qui se trouve en x et qui à l'instant t est définie par les fonctions M et Z. Au bout du temps δt, ces fonctions sont devenues respectivement $M + \frac{dM}{dt}\delta t$, $Z + \frac{dZ}{dt}\delta t$, qui définissent l'onde au point x à l'instant $t + \delta t$.

Or, cette dernière peut être considérée comme étant l'onde qui à l'instant t se trouvait au point $x - \delta x$ et qui, pendant le temps δt, a parcouru l'espace δx avec une vitesse égale à $\frac{\delta x}{\delta t}$.

L'onde au point x à l'instant $t + \delta t$ est alors définie par les fonctions $M - \frac{dM}{dx}\delta x$ et $Z - \frac{dZ}{dx}\delta x$. Dans ce cas, M et Z sont considérées comme des fonctions de x, tandis que, dans le cas précédent, on les considérait comme des fonctions de t. On aura donc :

$$\frac{dM}{dt}\delta t = -\frac{dM}{dx}\delta x \qquad (13)$$

$$\frac{dZ}{dt}\delta t = -\frac{dZ}{dx}\delta x. \qquad (14)$$

d'où, en tenant compte de (11) et (12),

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)^2 = \frac{KK'}{K''^2} = u^2.$$

La vitesse de propagation suivant mx est donc constante et égale à u; sa valeur ne dépend que des propriétés électriques et magnétiques du milieu.

Considérons maintenant un fil rectiligne parcouru par un courant alternatif, celui-ci va donner lieu à une série d'ondes se propageant à travers le diélectrique avec une vitesse constante et égale au rapport u des unités électromagnétiques et électrostatiques.

D'autre part, la mesure directe de u donne pour ce nombre une valeur égale à celle de la lumière dans le même milieu.

Une vibration électromagnétique se propageant dans un milieu donné avec la même vitesse qu'une vibration lumineuse, Maxwell en a conclu qu'il y avait non pas seulement *analogie*, mais *identité* entre les deux phénomènes, et qu'une vibration lumineuse n'est autre chose qu'un courant de déplacement alternatif. Il assigne ainsi la même origine aux phénomènes électriques et lumineux, de sorte que, quand nous mettons en mouvement une machine à courants alternatifs ou lorsque nous allumons une lampe, nous provoquons dans le milieu environnant des phénomènes de même nature.

La seule différence est dans la fréquence, c'est-à-dire le nombre des vibrations produites pendant une seconde. Si l'on prend, par exemple, la partie moyenne du spectre visible, la lumière jaune correspond à un nombre de vibrations par seconde $n = 6 \times 10^{14}$, soit 600 millions de vibrations en un millionième de seconde, tandis que les courants alternatifs industriels ne dépassent guère 100 périodes par seconde.

Malgré cette différence, la vitesse de propagation reste

la même, car elle ne dépend que des propriétés du milieu, et l'on a toujours :

$$u = \frac{\lambda}{T},$$

λ étant la longueur d'onde et $T = \frac{1}{n}$ la durée d'une vibration.

La lenteur relative des vibrations électromagnétiques ne les empêche donc pas de se propager avec la vitesse de la lumière, mais elle les empêche de produire sur l'organe de la vue les mêmes sensations que les vibrations lumineuses. On sait, en effet, que, dans la partie visible du spectre, la fréquence augmente du rouge au violet. Pour des fréquences plus faibles que celles de la lumière rouge ou plus grandes que celles de la lumière violette, la sensation lumineuse disparaît. Comme la fréquence des radiations rouges est encore de beaucoup supérieure à celle des vibrations électromagnétiques les plus rapides que nous sachions produire, il n'est pas surprenant que ces dernières soient sans action sur notre œil, tout en ayant la même nature que la lumière.

Malgré les progrès de la science, l'homme ne dispose encore que de moyens barbares pour produire la lumière, car il ne connaît pas, pour le moment, d'autre procédé que de prendre la chaleur comme intermédiaire. Pour communiquer à l'éther un mouvement vibratoire capable de produire ce que nous appelons les phénomènes lumineux, nous commençons par donner ce mouvement aux particules matérielles d'un corps solide ou gazeux en le portant à une température suffisamment élevée, et c'est ce corps qui, à son tour, provoque le mouvement des particules éthérées. Nous n'utilisons donc sous forme de lumière qu'une partie infime de l'énergie que nous avons dû dépenser pour produire d'abord de la chaleur. On voit par là quelle économie on réalisera,

le jour où l'on saura produire directement des courants alternatifs ayant la fréquence des radiations lumineuses.

Avant d'aborder l'exposé des vérifications expérimentales de l'hypothèse de Maxwell, nous dirons quelques mots de la manière dont celui-ci concevait le mécanisme intime des phénomènes.

Prenons d'abord les phénomènes magnétiques ; Maxwell admet que tout milieu susceptible de transmettre la force magnétique est constitué par la réunion de corpuscules ou cellules sphériques susceptibles de tourner. Sous l'influence de l'action magnétique, ces cellules prennent, autour des lignes de force comme axes, un mouvement de rotation dont le sens et la vitesse déterminent le sens et l'intensité de l'action.

Maxwell se représente donc un champ magnétique comme rempli de tourbillons moléculaires tournant tous dans le même sens et autour d'axes qui sont parallèles, lorsque le champ est uniforme. Par suite du mouvement de rotation, ces tourbillons tendent à se contracter suivant l'axe et à se dilater suivant l'équateur. Les lignes de force tendent donc à se raccourcir en se repoussant latéralement : on retombe ainsi sur l'hypothèse par laquelle Faraday expliquait les actions magnétiques.

Mais cela ne suffit pas à rendre compte de la transmission de la force magnétique dans le champ, au moment où celui-ci est créé. On conçoit bien, en effet, qu'un corps animé d'un mouvement de rotation puisse entraîner un corps semblable placé à côté de lui ; mais les deux corps tourneront alors en sens inverse, tandis que, suivant l'hypothèse de Maxwell, tous les tourbillons tournent dans le même sens.

Il introduisit alors une nouvelle supposition : entre les cellules tourbillonnantes existent des particules sphériques pouvant rouler sans glisser et servant à transmettre le mouvement d'un tourbillon à un autre sans modifier le sens de la rotation.

Ces particules constitueraient l'électricité, et l'ensemble des cellules et des particules électriques ne serait autre chose que l'éther. Ainsi, pour Maxwell, l'électricité imprégnerait la masse de l'éther comme l'eau imprègne une éponge, et l'éther, constitué comme on vient de le dire, imprégnerait à son tour les molécules matérielles, dont les dimensions seraient d'ailleurs considérables par rapport à celles des particules éthérées.

Le milieu hypothétique de Maxwell explique également les actions électriques. Il suffit pour cela d'admettre que, dans les diélectriques, les particules électriques ne peuvent subir que de faibles déplacements et sont arrêtées par les réactions élastiques qui correspondent à la force électrique en chaque point du champ.

Si, au contraire, on admet, comme nous l'avons dit plus haut, que dans les conducteurs les déplacements électriques n'éprouvent plus de résistance élastique, on aura l'explication des courants de conduction et en même temps des actions électromagnétiques et des phénomènes d'induction.

Prenons un conducteur cylindrique parcouru par un courant constant et considérons sa surface de séparation avec le diélectrique environnant. L'électricité qui se déplace dans le conducteur tend à entraîner celle du diélectrique, mais, comme celle-ci ne peut abandonner les cellules, on voit que le courant aura pour effet de faire tourner chaque cellule autour d'un axe perpendiculaire au plan qui contient la cellule et le fil. Toutes les cellules situées sur un même cercle concentrique au fil se mettent donc à tourner et le mouvement se transmet de proche en proche, en donnant une série d'anneaux roulant à la façon d'un tore en caoutchouc qui se déplace le long d'un bâton. Les axes des cellules représentant les lignes de force du champ magnétique, on voit que le courant doit produire un champ magnétique dont les

lignes de force sont des cercles ayant leurs centres sur l'axe du fil.

On voit aussi que, par suite de l'élasticité, les particules électriques se déplaceront un peu avant de transmettre le mouvement, de sorte qu'en même temps que le champ magnétique, le courant produira des courants de déplacement, c'est-à-dire un champ électrostatique, ce qui est encore conforme à l'expérience.

Ces deux champs sont inséparables et toute variation de l'un se traduit par une variation de l'autre. Leurs intensités en un même point sont perpendiculaires l'une à l'autre; car, d'après ce qui précède, l'intensité du champ électrique est parallèle au fil conducteur, tandis que l'intensité du champ magnétique est normale au plan formé par ces deux parallèles.

Nous venons de voir comment s'explique la production d'un champ magnétique par un courant. On peut également expliquer la production d'un courant au moyen d'un champ magnétique, c'est-à-dire les phénomènes d'induction.

Le champ magnétique étant établi, si l'on y introduit un conducteur à l'état neutre, les cellules du diélectrique en contact avec sa surface extérieure entraînent l'électricité du conducteur. Il se produit donc un courant qui est d'abord superficiel et pénètre ensuite jusqu'à l'axe du conducteur. Ce courant est d'ailleurs temporaire, car le diélectrique ne fait que communiquer à l'électricité du conducteur une certaine vitesse qui est détruite peu à peu par la résistance de ce conducteur. On voit en somme que tout déplacement relatif du conducteur et du champ magnétique doit donner naissance à un courant : c'est le phénomène de l'induction.

Ces vérifications peuvent être étendues à tous les phénomènes électriques ou magnétiques. En faut-il conclure pour cela que les hypothèses de Maxwell sur la constitution de l'éther correspondent à la réalité ? Ce serait évi-

demment téméraire, car elles n'ont reçu aucune confirmation directe et rien ne prouve que des hypothèses tout à fait différentes ne rendraient pas aussi bien compte des phénomènes.

On ne peut d'ailleurs méconnaître le caractère artificiel de ces hypothèses, que M. Poincaré qualifie même de *saugrenues*[1], et si nous les avons indiquées, c'est plutôt à titre de curiosité. Nous n'aurons pas du reste à en faire usage dans les chapitres qui suivent et nous retiendrons seulement celles qui ont servi à établir les formules générales.

---

1. H. Poincaré, *Les Oscillations électriques*. Collection *Scientia*.

CHAPITRE II

VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

Parmi toutes les hypothèses faites par Maxwell pour expliquer les phénomènes électriques et magnétiques, il faut faire une place à part à la théorie électromagnétique de la lumière. Car, dans ce cas, les hypothèses dont nous avons plus haut indiqué l'origine ont reçu directement de l'expérience des confirmations inattendues, dont nous allons nous occuper maintenant.

Reportons nous à la formule (6); si K, K', K'' sont les coefficients des formules de Coulomb et de Laplace relatifs au vide, le nombre

$$u = \frac{\sqrt{KK'}}{K''}$$

représente la vitesse de la lumière dans le vide. Par conséquent, dans un milieu où les coefficients ont des valeurs K_1, K_1', K_1'', la vitesse de la lumière sera :

$$u_1 = \frac{\sqrt{K_1 K_1'}}{K_1''}.$$

On en déduit :

$$\frac{u}{u_1} = \sqrt{\frac{K}{K_1}} \sqrt{\frac{K'}{K'_1}} \cdot \frac{K_1''}{K''}.$$

Or, le rapport $\frac{K}{K_1} = p$ est ce que Faraday appelait le *pouvoir inducteur spécifique* du milieu par rapport au vide. Quant au rapport $\frac{K_1'}{K'} = \mu$, c'est ce que sir W. Thomson a nommé la *perméabilité magnétique* de ce milieu, celle du vide étant prise comme terme de comparaison.

D'autre part, si l'on admet avec Maxwell que le champ magnétique dû à un courant a les mêmes propriétés que le champ produit par des aimants, le rapport $\frac{K_1''}{K''}$ est égal à μ.

Il en résulte :

$$\frac{u}{u_1} = \sqrt{p\mu}.$$

Le rapport $\frac{u}{u_1}$ des vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu considéré n'est autre chose que l'indice de réfraction n de ce milieu par rapport au vide ; de plus, pour tous les diélectriques, le vide compris, la perméabilité a sensiblement la même valeur ; il en résulte que *pour ces milieux* on pourra prendre $\mu = 1$, d'où :

$$p = n^2.$$

C'est-à-dire que, pour les diélectriques, le pouvoir inducteur spécifique doit être égal au carré de l'indice de réfraction. C'est ce que l'on vérifie sur un grand nombre de diélectriques solides et liquides.

Pour quelques substances toutefois, l'accord semblait moins satisfaisant. Bien que la théorie ou même les difficultés d'expériences permettent d'expliquer ces écarts, ceux-ci n'en laissent pas moins subsister un certain doute. C'est au savant allemand Henri Hertz (mort en 1894, âgé de 36 ans) que l'on doit des expériences confirmant d'une manière beaucoup plus précise l'hypothèse hardie de Maxwell.

Le meilleur moyen de prouver l'identité des radiations électromagnétiques et des radiations lumineuses, c'est évidemment de montrer que l'on peut reproduire, avec les premières, tous les phénomènes que l'on obtient avec les secondes. Mais, pour cela, il était nécessaire d'avoir recours à un procédé opératoire différant de tous ceux qu'on avait employés jusque-là. On ne pouvait

songer à utiliser les courants alternatifs ordinaires, car pour 100 périodes par seconde, la longueur d'onde est $\lambda = \frac{300\,000}{100}$, soit 3 000 km. Un laboratoire, si grand qu'on le suppose, ne pourrait donc contenir qu'une faible fraction d'onde.

Il fallait alors chercher à réaliser des longueurs d'ondes qui fussent sinon aussi courtes que les ondes lumineuses, du moins compatibles avec les dimensions que l'on pouvait donner aux appareils.

Pour y arriver, Hertz eut l'idée d'appliquer une propriété découverte en 1847 par Helmholtz qui, en étudiant la décharge des condensateurs, avait reconnu que, dans certains cas, celle-ci s'effectue par une série de décharges alternatives, de même qu'un pendule écarté de la verticale et abandonné à lui-même ne revient à sa position d'équilibre qu'après avoir effectué une série d'oscillations.

Cette propriété fut vérifiée expérimentalement par Feddersen et, en 1853, sir W. Thomson en donna l'explication théorique suivante.

Soit un condensateur de capacité C dont on provoque la décharge en réunissant ses armatures par un conducteur ayant une résistance R et un coefficient de self-induction L ; nous supposerons la capacité de ce conducteur négligeable par rapport à C.

Si Q est la charge à l'instant t, le fil est parcouru à cet instant par un courant i dû à une force électromotrice $\frac{Q}{C}$.

On a donc, pour l'équation du courant variable :

$$\frac{Q}{C} = Ri + L\frac{di}{dt}.$$

D'autre part, pendant le temps dt, une quantité dQ s'écoule à travers le fil ; donc :

$$i = -\frac{dQ}{dt} \qquad \frac{di}{dt} = -\frac{d^2Q}{dt^2},$$

d'où

$$L\frac{d^2Q}{dt^2}+R\frac{dQ}{dt}+\frac{Q}{C}=0. \qquad (15)$$

Si l'on considère Q comme la variable, l'équation (15) est une équation linéaire à coefficients constants dont l'intégrale générale est :

$$Q=Ae^{\rho t}+A'e^{\rho' t}, \qquad (16)$$

ρ et ρ' étant les racines de l'équation :

$$L\rho^2+R\rho+\frac{1}{C}=0. \qquad (17)$$

Quant à A et A′, ce sont deux constantes à déterminer d'après les conditions initiales. Pour $t=0$, on a, en appelant Q_0 la charge au début :

$$A+A'=Q_0. \qquad (18)$$

D'autre part, l'équation (16) différentiée donne :

$$\frac{dQ}{dt}=\rho Ae^{\rho t}+\rho' A'e^{\rho' t}.$$

Or, pour $t=0$, l'intensité $i=-\frac{dQ}{dt}$ est nulle ; on a donc :

$$\rho A+\rho' A'=0. \qquad (19)$$

Des équations (18) et (19) on déduit :

$$A=-\frac{Q_0\rho'}{\rho-\rho'}, \qquad A'=\frac{Q_0\rho}{\rho-\rho'}. \qquad (20)$$

Deux cas sont à examiner, suivant que les racines de l'équation (17) sont réelles ou imaginaires.

Lorsque ces racines sont réelles, elles sont en même temps négatives. Donc à mesure que t augmente, la charge Q décroît et s'annule théoriquement pour $t=\infty$.

Le courant qui parcourt le fil est toujours de même sens et le condensateur se décharge en une seule fois.

Si, au contraire, les racines sont imaginaires, on peut poser :

$$\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} = m^2, \qquad (21)$$

d'où

$$\rho = -\frac{R}{2L} + m\sqrt{-1}, \qquad \rho' = -\frac{R}{2L} - m\sqrt{-1}$$

$$Q = e^{-\frac{Rt}{2L}}\left(Ae^{mt\sqrt{-1}} + A'e^{-mt\sqrt{-1}}\right). \qquad (22)$$

Or, en considérant les développements en série des fonctions e^x, sin x et cos x, on démontre en algèbre la formule suivante due à Euler :

$$e^{x\sqrt{-1}} = \cos x + \sqrt{-1}\sin x.$$

En faisant $x = mt$ et appliquant cette formule à l'équation (22), celle-ci devient :

$$Q = e^{-\frac{Rt}{2L}}\left[A(\cos mt + \sqrt{-1}\sin mt) + A'(\cos mt - \sqrt{-1}\sin mt)\right].$$

Enfin, remplaçant A et A' par les valeurs (20), il vient, toutes réductions faites :

$$Q = Q_0 e^{-\frac{Rt}{2L}}\left(\cos mt + \frac{R}{2mL}\sin mt\right),$$

d'où l'on déduit, pour l'intensité du courant de décharge à l'instant t :

$$i = -\frac{dQ}{dt} = \frac{Q_0}{mLC} e^{-\frac{Rt}{2L}} \sin mt,$$

c'est-à-dire que ce courant est *alternatif*. La durée T d'une période complète est alors :

$$T = \frac{2\pi}{m} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

On s'expliquera facilement ces résultats si l'on admet l'assimilation du diélectrique à un ressort tendu par la charge. Lorsque la cause de cette tension disparaît, le diélectrique revient, en général, comme le ressort, à sa position initiale par une série d'oscillations.

Pour empêcher le ressort d'osciller, il faudrait opposer une résistance à son mouvement, par exemple en le plongeant dans un milieu visqueux. De même, on empêche les oscillations du diélectrique en présentant à la décharge du condensateur une résistance R suffisamment grande.

La valeur de T peut s'écrire :

$$T = \frac{2\pi\sqrt{CL}}{\sqrt{1 - \frac{CR^2}{4L}}}.$$

La capacité étant exprimée en farads dans cette formule, il en résulte que le nombre C est toujours très petit. On peut alors négliger la fraction $\frac{CR^2}{4L}$ devant l'unité, ce qui donne pour la durée T de l'oscillation :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

On voit, d'après ce qui précède, que l'on pourrait réaliser des oscillations électriques en procédant de la manière suivante.

Deux sphères métalliques A et B isolées l'une de l'autre (fig. 4) et constituant un condensateur sont reliées aux pôles d'une source d'électricité, bobine de Ruhmkorff ou machine électrostatique, qui établit entre elles une différence de potentiel.

Si on les réunit par un fil continu *ab*, ce fil sera le siège de décharges alternatives, pourvu que les dimensions de l'appareil satisfassent aux conditions indiquées par la formule (21).

En procédant ainsi, on n'obtiendrait qu'un phénomène de très courte durée, à peu près impossible à observer. Pour tourner la difficulté, Hertz interrompit le conducteur *ab*, de manière à laisser en son milieu un petit

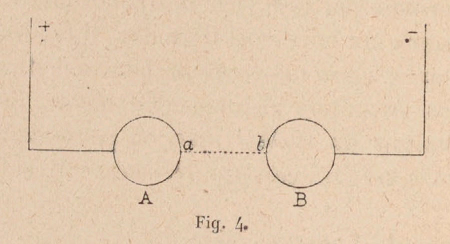


Fig. 4.

intervalle *mm'* (fig. 5). La décharge s'effectue alors par une étincelle qui jaillit entre *m* et *m'*, lorsque la différence de potentiel entre les deux sphères a atteint une valeur suffisante. Cette étincelle joue le rôle d'un conducteur reliant les deux sphères, avec cette différence qu'une fois la décharge effectuée, les sphères peuvent se charger à nouveau pour se décharger ensuite, de sorte que l'on obtient entre les points *mm'* une série de décharges oscillantes se succédant sans interruption aussi long-

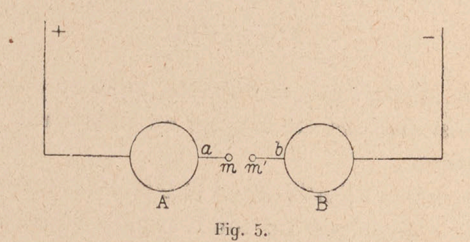


Fig. 5.

temps que la source fonctionne. Cet appareil constitue ce que Hertz a appelé l'*excitateur* ou l'*oscillateur*.

Quant à la durée des oscillations, on conçoit qu'on puisse la déterminer par la formule de Thomson, puisque l'on peut calculer directement les valeurs de L et de C en les déduisant des dimensions de l'appareil.

Dans ses premières expériences, avec des sphères de 0,30 m de diamètre, placées à 1,50 m l'une de l'autre, Hertz obtint des oscillations dont la durée en secondes était $T = 1{,}77 \times 10^{-8}$; en admettant que ces oscillations se propagent avec la vitesse de la lumière, leur longueur d'onde serait de 5,30 m environ.

Bien que plus tard Hertz ait réussi à réduire la longueur d'onde, les radiations obtenues étaient encore trop lentes pour agir sur l'organe de la vue. Il fallait donc, pour les étudier, réaliser un instrument destiné à remplacer l'œil. Dans ce but, Hertz employa comme récepteur un circuit composé d'une seule spire de fil métallique (fig. 6). L'anneau ainsi formé était interrompu et terminé à ses extrémités par deux petites boules *a* et *b*.

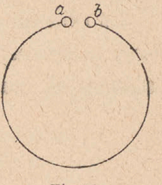


Fig. 6.

Cet appareil peut être considéré comme un condensateur dont les armatures seraient réunies en permanence par un arc métallique. Lorsqu'on l'introduit dans le champ, les variations de celui-ci donnent naissance à des forces électromotrices d'induction qui chargent le condensateur et, lorsque la différence de potentiel entre *a* et *b* est devenue assez grande, une étincelle jaillit entre les deux boules en déchargeant le condensateur. On aura donc en *ab* une série d'étincelles qui pourront servir à déceler l'existence du champ alternatif.

Ces étincelles seront elles-mêmes oscillantes, si les dimensions de l'appareil ont été convenablement choisies, de sorte que l'on aura entre *a* et *b* une série de décharges alternatives. On conçoit que ces décharges auront leur intensité maxima si leur période est la même que celle des renversements du champ qui produisent les courants de charge ; car alors le condensateur se décharge en totalité par les étincelles et non par le fil qui réunit les armatures *a* et *b*.

On doit donc déterminer les dimensions du récepteur de manière que ces conditions soient remplies, c'est-à-dire en tenant compte de la période des oscillations fournies par l'excitateur. Le récepteur fonctionne alors à la façon d'un résonateur acoustique qui renforce seulement le son qu'il peut émettre directement. De là, le nom de *résonateur* donné par Hertz à son appareil récepteur des ondes électriques.

Le résonateur, étant construit de manière à posséder son maximum de sensibilité, peut servir à explorer le champ et, suivant le degré d'intensité des étincelles, à

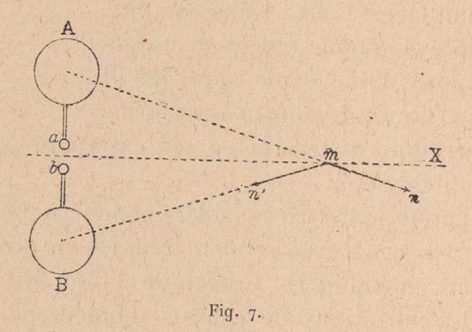


Fig. 7.

indiquer comment varie ce champ en ses différents points.

Nous avons vu plus haut que les équations de Maxwell conduisent à cette conséquence que, quand une onde plane résultant d'une perturbation électromagnétique se propage dans un diélectrique, les forces électrique et magnétique sont constamment dans le plan de l'onde et perpendiculaires l'une à l'autre. Dans le cas particulier de l'oscillateur de Hertz, on peut retrouver directement ces résultats.

Considérons en effet un point m situé dans les plans de symétrie de l'oscillateur (fig. 7). Les décharges oscillantes de ab produisent en m deux sortes d'actions : les unes électrostatiques, qui résultent des variations de

charge des sphères A et B, les autres magnétiques, dues aux courants alternatifs entre *a* et *b*.

La force électrique en *m* est la résultante des actions exercées par les sphères A et B, dirigées respectivement suivant A*m* et B*m*. On peut d'ailleurs admettre que les charges de A et B sont à chaque instant égales et de signes contraires, c'est-à-dire que les deux composantes *mn*, *mn'* du champ électrostatique sont toujours égales entre elles et situées du même côté de *m*X. Leur résultante est donc constamment parallèle à AB.

Quant au champ magnétique produit par le courant dirigé suivant *ab*, on sait que ses lignes de force sont des circonférences ayant leur centre sur *ab* et dont le plan est normal à *ab*. La force magnétique au point *m* est donc dirigée perpendiculairement au plan AB*m*, que nous avons pris comme plan de la figure.

Les intensités des champs électrostatique et magnétique sont donc rectangulaires et leur plan est normal à la direction de propagation *m*X. Si, de plus, on examine de près le fonctionnement de l'excitateur, on se rendra compte facilement que les maximums d'intensité du courant *ab* correspondent aux minimums de charge des sphères A et B, et réciproquement. Il en sera de même des intensités des deux champs alternatifs au point *m*, ce qui revient à dire que ces deux champs ont entre eux une différence de phase d'un quart de période.

Ces divers résultats peuvent être vérifiés à l'aide du résonateur de Hertz. Menons par le point *m* trois axes rectangulaires *m*X, *m*Y, *m*Z (fig. 8) respectivement suivant la direction de propagation, l'intensité du champ électrostatique et l'intensité du champ magnétique. Le centre du résonateur restant toujours en *m*, on pourra faire varier l'orientation du résonateur dans son plan et la position de ce plan.

Considérons d'abord les actions électrostatiques. Celles-ci seront nulles, si le plan du résonateur est perpendicu-

laire à la direction mY des lignes de force du champ électrostatique. On doit donc rechercher l'effet maximum des actions électrostatiques en plaçant le résonateur dans le plan YZ, parallèle aux lignes de force. L'intensité de l'action dépend alors de la position de la coupure ab. Si cette coupure est sur mY, comme dans la figure 8, les boules ont constamment, par raison de symétrie, des potentiels égaux : il n'y a donc pas d'étincelles. Le maximum aura lieu, au contraire, si la coupure se trouve sur mZ.

Tant que le résonateur est dans le plan YZ, l'action du champ magnétique est nulle ; car on est alors sensible-

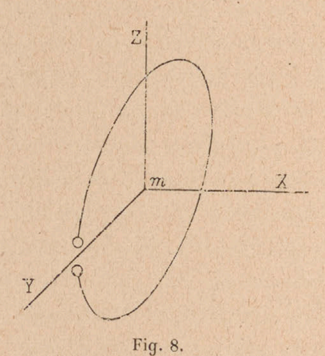


Fig. 8.

ment dans le même cas qu'un circuit fermé qui se déplace parallèlement à lui-même dans un champ magnétique uniforme. On peut donc ainsi étudier l'action due au champ électrostatique seul.

Pour obtenir l'action maximum due au champ magnétique, il faudra placer le résonateur perpendiculairement aux lignes de force de ce champ, c'est-à-dire dans le plan XY. Il ne sera plus nécessaire alors de tenir compte de l'orientation de la coupure, puisque, dans ce cas, les courants induits dans le résonateur ne dépendent que de la variation du flux de force qui traverse le circuit.

On voit enfin que, si l'on place le résonateur dans le plan XZ, qui est le plan de symétrie de l'excitateur, le

résonateur est soustrait à la fois à l'influence des deux champs.

Une fois en possession de ces appareils, Hertz s'est préoccupé de mesurer par l'expérience la vitesse de propagation des ondes émises par l'excitateur. Il appliqua pour cela la méthode employée par Biot pour mesurer la vitesse du son dans les gaz. L'onde ayant parcouru un certain trajet, si on la réfléchit de manière à la faire revenir en arrière, l'onde directe et l'onde réfléchie interfèrent et il se produit des nœuds et des ventres. Il suffit alors de déterminer la position de deux nœuds consécutifs pour en déduire d'abord la longueur d'onde et ensuite la vitesse de propagation.

Pour produire la réflexion de l'onde électromagnétique, Hertz la recevait sur une surface métallique, normale au rayon. En déplaçant le résonateur le long de ce rayon, il constatait que les étincelles n'avaient pas partout la même intensité; la position où cette intensité est minimum correspond à un nœud, celle où elle est maximum correspond à un ventre.

Suivant l'orientation donnée au résonateur, on peut étudier séparément l'onde électrostatique et l'onde électromagnétique ; on reconnaît ainsi qu'elles ont la même vitesse de propagation, tout en ayant l'une par rapport à l'autre un retard d'un quart de période. De plus, on peut mesurer cette vitesse de propagation, que Hertz indiqua comme très voisine de la vitesse de la lumière.

Les expériences présentaient toutefois de grandes difficultés provenant de ce que, l'amortissement des ondes électriques dans l'air étant très rapide, on ne pouvait opérer que sur de faibles distances. Pour augmenter la portée et en même temps le degré de précision des résultats, Hertz chercha alors à mesurer la vitesse de propagation des ondes, non plus dans l'air seul, mais dans des fils conducteurs.

La théorie montre en effet, indépendamment de toute

hypothèse sur la nature intime des phénomènes, que la vitesse doit être la même dans les deux cas, à la condition toutefois que les oscillations soient suffisamment rapides. On sait que la résistance offerte par un conducteur au passage d'un courant alternatif est représentée par le radical $\sqrt{R^2 + m^2 L^2}$ que l'on nomme *l'impédance*. R est la résistance *ohmique*, qui ne dépend pas de la période et est la même que pour les courants continus. Quant au deuxième terme $m^2 L^2$, il dépend à la fois du coefficient de self-induction L et du nombre $m = \frac{2\pi}{T}$ qui est proportionnel à la fréquence. Il en résulte que, si m est très grand, comme R est en général assez faible, le premier terme du radical peut être négligé et le conducteur peut être considéré comme un conducteur *parfait*, c'est-à-dire sans résistance. Les choses se passent alors comme si le courant était dû à des charges statiques se déplaçant à la surface du conducteur, sans pénétrer dans son intérieur.

Ces idées ont été développées par Heaviside et Poynting, qui considèrent un courant électrique comme ayant son siège non pas dans le conducteur, mais dans le diélectrique qui l'entoure, du moins en ce qui concerne l'énergie transportée. Si la résistance du conducteur est nulle, cette énergie arrive tout entière à l'extrémité du conducteur, comme si celui-ci n'existait pas. Si, au contraire, la résistance du conducteur n'est pas négligeable, une partie de l'énergie transportée se diffuse dans le conducteur, où elle se retrouve sous forme de chaleur. Si les variations du courant sont très rapides, cette diffusion n'atteint que les couches superficielles ; lorsque les variations sont nulles, c'est-à-dire dans le cas du courant continu, la diffusion pénètre jusqu'au centre du conducteur et la totalité de l'énergie est transformée en chaleur.

Ces considérations, qui sont d'ailleurs conformes aux idées de Maxwell, permettaient à Hertz de supposer que la vitesse de propagation des ondes le long des fils con-

ducteurs devait être la même que dans l'air, c'est-à-dire égale à celle de la lumière. Cependant, l'expérience ne confirma pas ces prévisions et donna des vitesses notablement moindres que celles qu'indiquait la théorie.

Il semblait donc y avoir désaccord entre la théorie et l'expérience. Deux physiciens genevois, MM. Sarasin et de la Rive, indiquèrent la principale raison de ce désaccord. Pour obtenir la vitesse de propagation, Hertz mesurait directement la longueur d'onde, puis, au moyen de la formule de Thomson, il calculait la durée T de la période, d'après les dimensions de l'excitateur.

Or, MM. Sarasin et de la Rive constatèrent que si l'on fait varier les dimensions du résonateur, l'excitateur restant le même, la longueur d'onde varie, de sorte que celle-ci doit être calculée non pas d'après les dimensions de l'excitateur, comme le faisait Hertz, mais d'après celles du résonateur. En opérant de cette façon, le désaccord disparaît et l'expérience donne des résultats conformes à ceux qu'indiquait la théorie.

MM. Sarasin et de la Rive donnèrent le nom de *résonance multiple* à ce phénomène pour lequel ils proposaient l'explication suivante. En raison de sa forme complexe, l'excitateur produit non pas des ondes de période bien déterminée, mais un ensemble d'oscillations de périodes différentes, qui se superposent les unes aux autres. En d'autres termes, le phénomène de la décharge étant représenté par la série de Fourier, on aurait une oscillation principale accompagnée d'un nombre plus ou moins considérable d'harmoniques. Parmi toutes ces oscillations, le résonateur choisit celle qui correspond à sa période propre, de sorte que la longueur d'onde mesurée résulte exclusivement des dimensions du résonateur.

Malheureusement, cette explication, qui faisait disparaître un désaccord entre la théorie et l'expérience, venait en faire apparaître un autre.

En cherchant à faire intervenir dans le calcul les divers

éléments qui composent le circuit de l'excitateur et, en particulier, la bobine d'induction, M. Poincaré reconnut que celle-ci influe très peu sur la période de l'excitateur, calculée comme l'avait fait Hertz et que, quand la période de l'excitateur est nettement déterminée, la longueur des ondes transmises n'en est pas moins fixée par le résonateur [1]. M. Poincaré proposa alors une autre explication du phénomène de la résonance multiple découvert par MM. Sarasin et de la Rive. Sans entrer dans le détail des calculs, nous dirons simplement que, d'après M. Poincaré, la résonance multiple peut être attribuée à l'amortissement que subissent les oscillations émises par l'excitateur [2]. M. Bjerkness a montré que cet amortissement est considérable pour l'excitateur, tandis qu'il est au contraire très faible pour le résonateur. D'autre part, des expériences directes ont confirmé la manière de voir de M. Poincaré.

Quoi qu'il en soit, les travaux de MM. Sarasin et de la Rive furent le point de départ d'une nouvelle série de recherches, parmi lesquelles il faut citer les expériences faites en France par M. Blondlot. Adoptant l'idée que le résonateur seul détermine la valeur de T, M. Blondlot modifia la forme adoptée par Hertz de manière à pouvoir appliquer plus facilement la formule de Thomson au calcul de T.

Nous devons nous borner ici à indiquer les résultats de ces expériences, ainsi que de celles dont il sera parlé ci-après ; pour le détail des méthodes suivies et des dispositifs adoptés par les différents expérimentateurs, nous renverrons au rapport présenté par MM. Blondlot et Gutton au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900.

Les premières expériences de M. Blondlot datent de

1. *Les Oscillations électriques*, par H. Poincaré, p. 46. Paris, 1894.
2. *Les Oscillations électriques*, par H. Poincaré, p. 105 et suivantes. Paris, 1894

1891 ; en faisant varier les dimensions des résonateurs, il trouva, pour une série de douze expériences, la valeur moyenne de 302 200 km par seconde.

Dans une nouvelle série de recherches faites en 1893, M. Blondlot chercha à déterminer la vitesse avec laquelle se propage le long d'un fil non plus un mouvement oscillatoire, mais une simple perturbation électromagnétique, vitesse qui, d'après la théorie, doit aussi être égale à celle de la lumière.

Des expériences avaient déjà été tentées dans cet ordre d'idées. En 1834, Wheatstone avait trouvé, à l'aide d'un miroir tournant, une vitesse de 460 000 km ; en 1849, l'Américain Walker avait trouvé seulement 30 000 km. En 1850, MM. Fizeau et Gounelle, appliquant le procédé employé par Fizeau pour mesurer la vitesse de la lumière, obtenaient, pour la vitesse de l'électricité, 100 000 km dans le fer et 180 000 km dans le cuivre. Enfin M. W. Siemens, opérant en 1876 sur une ligne télégraphique en fer, trouvait pour le plus élevé de ses résultats 256 600 km.

En opérant sur des lignes de longueur variées, M. Blondlot obtint une moyenne de 298 000 km, valeur voisine de celle qu'il avait obtenue dans le cas des oscillations. La théorie se trouvait donc vérifiée par des procédés entièrement différents.

En 1895, MM. Trowbridge et Duane obtinrent, pour la propagation des ondes le long d'un fil de cuivre, la vitesse de 300 300 km. En 1897, M. Clarence-G. Saunders trouvait 299 700 km. Enfin, en 1899, M. Mac Lean trouvait, pour la propagation des ondes dans l'air, 299 110 km.

Tous ces nombres présentent une concordance remarquable, de sorte que finalement l'expérience assigne des valeurs très voisines à ces trois grandeurs : le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques et la vitesse de la lumière. Étant donnés la difficulté des mesures et le degré de précision qu'elles peuvent comporter, les

écarts ne sont pas de nature à infirmer la conclusion de Maxwell, à savoir que ces valeurs sont non seulement voisines, mais égales. On conçoit cependant l'intérêt qui s'attache à toute vérification qui viendra augmenter la probabilité de cette conclusion.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, s'il y a identité entre les ondes électromagnétiques et les ondes lumineuses, on doit pouvoir reproduire avec les premières tous les phénomènes qu'on obtient avec la lumière. Déjà, en étudiant la propagation, Hertz avait constaté la réflexion des ondes sur des surfaces métalliques planes. Après avoir vérifié que les lois de cette réflexion sont les mêmes que pour la lumière, il réussit à obtenir la concentration des ondes au moyen de miroirs concaves. Ceux-ci étaient constitués par la surface intérieure d'un cylindre parabolique en métal dont la ligne focale contenait l'excitateur. En plaçant un miroir semblable derrière le résonateur, Hertz put reproduire l'expérience des miroirs conjugués. Dans ce cas, le résonateur était formé de deux fils rectilignes situés dans le prolongement l'un de l'autre et terminés, aux extrémités en regard, par deux petites boules entre lesquelles se produisaient les étincelles. Le résonateur formait alors un condensateur dont les armatures restaient isolées l'une de l'autre.

Hertz put également produire la réfraction des ondes en employant un prisme en asphalte ayant 1,50 m de hauteur et dont la base était un triangle équilatéral de 1,20 m de côté.

Enfin, en recevant les ondes sur les réseaux formés de fils métalliques parallèles, Hertz put reproduire les principaux phénomènes de polarisation rectiligne.

Les expériences de Hertz furent répétées dans tous les pays par un grand nombre de savants. Il faut citer en première ligne M. Lodge, en Angleterre, qui, sans avoir connaissance des travaux de Hertz, avait déjà obtenu des résultats analogues, en utilisant les ondes provenant de

la décharge oscillante d'une bouteille de Leyde. Nous citerons ensuite les expériences de M. Lecher (1890), dont le dispositif a été adopté par Hertz pour étudier la propagation des ondes le long des fils, celles de M. J. J. Thomson pour l'étude de la propagation dans divers diélectriques[1], celles de M. Turpain (1897) sur les champs interférents et la propagation dans les diélectriques.

Mais les expériences les plus complètes faites en vue de la reproduction de phénomènes analogues à ceux de l'optique sont celles de M. Righi, qui, en outre des résultats déjà obtenus par Hertz sur la réflexion et la réfraction, réussit à reproduire, avec les ondes électromagnétiques, les expériences d'optique ci-après :

Expérience des deux miroirs de Fresnel et production des franges d'interférence ; expérience du biprisme en employant un bloc de soufre ; diffraction par une fente étroite ou par le bord d'un écran. M. Righi constata également : la réflexion sur les diélectriques et l'application des formules de Fresnel à la réflexion sur les corps transparents, la production d'ondes elliptiques et circulaires, la réflexion totale, la polarisation par réfraction à travers une pile de lames de paraffine, etc.

Le phénomène de la double réfraction a été obtenu pour la première fois par M. Righi avec des lames de bois. Plus tard, on le réalisa avec des lames cristallines et en particulier avec le gypse. Le bois se comporte comme un biréfringent à un axe et rappelle les propriétés optiques de la tourmaline. On a pu faire avec le bois des lames demi-onde et quart d'onde.

Citons enfin les expériences de M. Lebedew, qui reconnut la double réfraction du soufre et réussit à construire un nicol en soufre pour ondes de 6 mm.

Dans toutes les recherches faites en vue de reproduire les phénomènes de l'optique au moyen des ondes élec-

---

1 *La Lumière électrique* du 30 août 1890.

triques, les expérimentateurs se sont avant tout préoccupés de réduire les longueurs d'onde, afin de ne pas être obligés de donner aux appareils des dimensions exagérées. Hertz lui-même était entré dans cette voie et, dans ses expériences sur la réfraction, il avait opéré avec des ondes de 0,66 m; mais il ne paraît pas qu'il soit descendu au-dessous. En modifiant la disposition de l'excitateur, M. Righi produisit des ondes de 25 mm. M. Bose, professeur à Calcutta, réussit à obtenir des ondes de 6 mm seulement, longueur qui a encore été abaissée par M. Lebedew.

Mais, en même temps qu'on diminue la longueur d'onde, on diminue considérablement la quantité d'énergie transmise, de sorte que l'on fut amené à rechercher, pour déceler les ondes électriques, des appareils plus sensibles que le résonateur primitif de Hertz. Ces recherches conduisirent à reconnaître que la présence des ondes peut être révélée par les procédés les plus divers. Il n'entre pas dans le cadre de cette étude de les décrire tous et nous renverrons aux classifications très complètes qui en ont été faites par M. le docteur A. Pochettino [1] et par M. Righi [2]. Nous nous contenterons d'en indiquer ici les principaux types.

Il faut signaler en premier lieu les appareils qui dérivent du résonateur de Hertz, composé d'un circuit circulaire avec micromètre à étincelles. M. Blondlot a adopté la même disposition, mais en donnant au circuit la forme d'un rectangle. Sur le milieu de l'un des grands côtés est intercalé un condensateur formé de deux plateaux placés en regard l'un de l'autre. Le micromètre est alors constitué par une boule et une pointe, soudées respectivement à chaque plateau et entre lesquelles jaillissent les étincelles.

Pour ses expériences sur la réflexion des ondes, Hertz avait employé la disposition que nous avons indiquée

1. *L'Éclairage électrique*, t. XVIII, p. 158.
2. Rapport au Congrès international de physique de 1900.

plus haut, et qui consiste à former le résonateur de deux fils placés dans le prolongement l'un de l'autre, les extrémités en regard étant séparées par un petit intervalle. On retrouve cette disposition dans le résonateur de M. Righi, qui obtient une très grande sensibilité en construisant l'appareil de la façon suivante : une mince couche d'argent formant une bande étroite est déposée sur une lame de verre, puis divisée en deux parties par un trait de diamant. C'est dans l'intervalle étroit ainsi réalisé que jaillissent les étincelles.

Une disposition heureuse est celle du résonateur à coupure de M. Turpain[1]. Le circuit est circulaire comme dans le résonateur de Hertz, mais, en outre de l'interruption créée par le micromètre, ce circuit en porte une deuxième plus large dont on peut faire varier la position par rapport à la première. Ce dispositif ingénieux a été fécond en résultats et a permis à M. Turpain de réaliser une étude approfondie du champ hertzien.

Lorsqu'on diminue la longueur d'onde, les étincelles deviennent plus faibles et par suite plus difficiles à observer. Aussi un grand nombre des modifications apportées au résonateur de Hertz ont-elles eu pour objet de faciliter l'observation des étincelles. On peut, par exemple, les faire éclater dans un espace vide, tubes de Geissler, lampes à incandescence dont le filament est interrompu (Lecher, Borgmann, Drude, Zehnder, etc.).

Pour déceler la présence des étincelles devant un auditoire nombreux, on les a fait jaillir dans un mélange détonant de chlore et d'hydrogène (Lucas et Garret) ou bien devant un papier sensibilisé à l'iodure de potassium (Dragoumis). On peut enfin rapprocher de ces procédés, destinés aux leçons publiques, celui du professeur Ritter, qui utilisait les contractions d'une grenouille préparée comme pour l'expérience de Galvani.

---

1. *Comptes rendus*, 31 janvier 1898.

Dans les appareils que nous venons de citer, ce sont les étincelles jaillissant dans l'intervalle micrométrique du résonateur qui décèlent la présence des ondes électriques. Dans ceux dont il nous reste à parler, les expérimentateurs ont cherché à observer d'autres effets de la force électromotrice induite qui donne naissance à ces étincelles.

Un premier procédé consiste à observer cette force électromotrice elle-même à l'aide d'un électromètre. On peut ainsi étudier les ondes dans l'air (Blyth) ou bien le long des fils conducteurs (Franke).

Ce procédé a été également appliqué par Hertz ; mais, dans ses expériences avec le dispositif de Lecher pour la propagation des ondes le long des fils conducteurs, il remplaçait l'électromètre par de simples circuits rectilignes ou circulaires, mobiles par rapport au système des deux fils. Les actions qui s'exerçaient en vertu de la loi de Lenz étaient alors mesurées par la torsion des fils de suspension.

On a aussi utilisé les effets thermiques des courants induits produits par les ondes, pour déceler la présence de celles-ci. On peut d'abord mesurer l'allongement d'un fil disposé de manière à les recevoir (Gregory). On peut aussi mesurer la chaleur développée dans ce fil par le procédé du bolomètre ; c'est alors la variation de résistance électrique du conducteur que l'on observe (Rubens). Enfin, on peut remplacer le bolomètre par une pile thermo-électrique. C'est cette dernière disposition qui a été employée dans toutes les expériences de Lebedew.

Nous arrivons enfin à l'importante catégorie des tubes à limaille, désignés sous le nom de *cohéreurs*. En 1870, Varley avait eu l'idée d'employer, pour protéger les appareils télégraphiques contre la foudre, des poudres conductrices telles que les limailles métalliques. Par suite du peu d'étendue des points de contact, une semblable poudre présente une résistance électrique considérable et peut être considérée comme empêchant le passage d'un

courant ordinaire, tandis qu'elle laisserait passer facilement une décharge à haut potentiel, telle qu'une décharge atmosphérique. Malheureusement, Varley constata qu'après une forte décharge, les particules métalliques se trouvaient en contact intime et formaient une masse conductrice continue. On dut par suite renoncer à l'application que l'on avait en vue et les expériences ne furent pas poursuivies, le phénomène observé ayant été attribué simplement à la chaleur développée par la décharge.

C'est seulement en 1884 que le professeur Calzecchi-Onesti constata la diminution de résistance électrique d'une colonne de limaille métallique, sous l'action de faibles courants. La limaille était enfermée dans un tube de matière isolante portant à ses extrémités deux électrodes métalliques qui amenaient le courant. Les courants qui produisaient le phénomène étaient ordinairement des extra-courants ou des courants induits. Enfin le physicien italien reconnut qu'il suffisait de faire tourner d'une petite quantité le tube autour de son axe pour faire disparaître la conductibilité acquise temporairement par la limaille.

Mais c'est M. Branly qui, en 1890, signala le premier l'action exercée *à distance* par une décharge oscillante sur un tube à limaille. Il put d'ailleurs faire varier dans de très larges limites la grosseur des particules métalliques, depuis l'état pulvérulent jusqu'à des billes sphériques ayant plus de 1 centimètre de diamètre. M. Branly fit aussi varier la nature des métaux employés et dans tous les cas il constata qu'une étincelle éclatant à une certaine distance du tube suffisait à le rendre conducteur, tandis que cette conductibilité disparaissait sous l'action de trépidations et surtout d'un choc brusque.

C'est M. Lodge qui le premier a montré le parti que l'on pouvait tirer des tubes à limaille comme indicateurs des ondes électriques. Selon lui, les ondes ont pour effet d'orienter les particules et, suivant son expression, de

les *cohérer*, d'où le nom de *cohéreur* donné par lui au tube de Branly.

L'explication donnée par M. Lodge ne paraissant pas absolument satisfaisante à M. Branly, ce dernier proposait de donner au tube à limaille le nom de *radioconducteur*. Ce nom était peut-être plus exact au point de vue théorique, mais il avait l'inconvénient d'être plus long, et celui de cohéreur a prévalu.

Nous examinerons plus loin en détail les différentes théories qui ont été proposées pour expliquer le fonctionnement des tubes à limaille. Mais il nous reste encore à citer deux séries d'expériences qui achèveront de montrer comment on a été conduit à l'emploi des ondes hertziennes pour la télégraphie sans fil.

Les premières sont celles de M. Lodge, qui songea à utiliser les propriétés du cohéreur pour répéter les expériences de Hertz. Lorsqu'un cohéreur a été soumis à l'action des ondes, il est devenu conducteur et ne peut être employé à nouveau qu'à la condition de recevoir un choc qui lui rend sa sensibilité primitive en lui faisant perdre sa conductibilité. M. Lodge eut alors recours à l'artifice suivant. Le cohéreur était intercalé dans un circuit contenant un relais et une pile et, à l'état neutre, la résistance de la limaille était assez grande pour que le courant de la pile ne fît pas fonctionner le relais. Dès que, sous l'action des ondes, la résistance du tube s'était abaissée, le relais était actionné et fermait un circuit local contenant une pile et un trembleur, par exemple une sonnerie dont le timbre était supprimé et dont le marteau venait frapper sur le tube. Celui-ci reprenant sa résistance primitive, le courant du relais cessait de passer et le circuit local s'ouvrait.

On était ainsi en possession d'un détecteur d'ondes à la fois plus sensible et plus commode que le résonateur de Hertz. C'est ce dispositif qui fut employé en 1895 dans les expériences dont nous avons encore à parler et

qui sont celles de Popoff, alors professeur à l'école de marine de Cronstadt.

Ces expériences avaient pour but l'étude de l'électricité atmosphérique. Plusieurs observateurs, entre autres M. Lodge, avaient émis cette idée que le plus souvent les décharges de la foudre doivent être oscillatoires. Popoff entreprit de vérifier ce fait au moyen du cohéreur, en l'utilisant en même temps à enregistrer les décharges

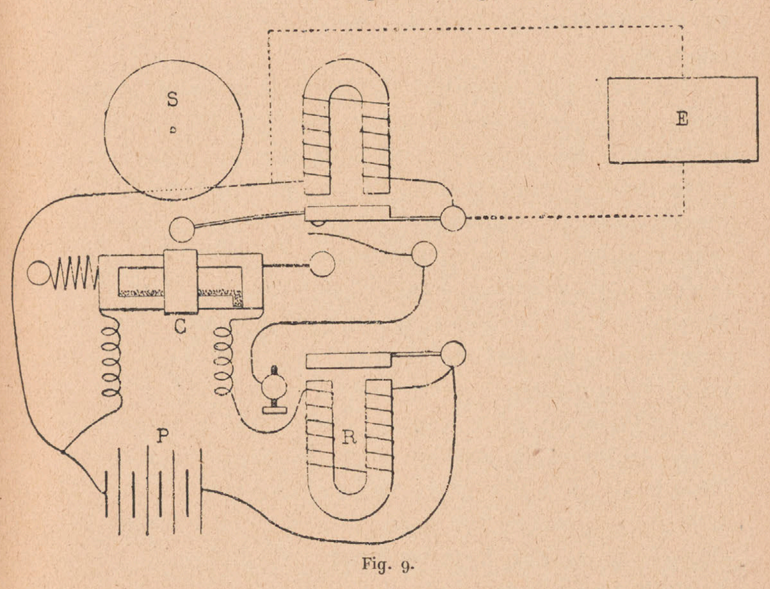


Fig. 9.

éloignées. Pour cela, l'une des extrémités du cohéreur était reliée à la tige d'un paratonnerre ou simplement à un fil métallique se relevant verticalement le long d'un mât; l'autre électrode du cohéreur était mise à la terre. Les deux électrodes étaient, en outre, reliées, suivant la disposition indiquée par Lodge, à un circuit comprenant une pile et un relais. La figure 9 représente le schéma de cette installation [1]. En C est le cohéreur, sur les bornes

1. Voisenat, *Annales télégraphiques*, mars-avril 1898.

duquel est branché le circuit contenant la pile P et le relais R; l'une de ces bornes est reliée à la tige verticale dressée dans l'atmosphère, l'autre est mise à la terre. Un deuxième circuit, contenant une sonnerie S et le contact du relais, était placé en dérivation sur le premier aux bornes de la pile. Le marteau de la sonnerie était disposé de telle façon qu'il pût frapper le cohéreur à chacune de ses vibrations. L'inscription graphique était obtenue par un enregistreur Richard E, monté en dérivation sur la sonnerie.

Pour éviter les effets des étincelles de la sonnerie et du relais, le cohéreur était entouré d'une double enveloppe métallique dans laquelle était pratiquée une fente étroite permettant le passage des ondes à étudier. Sous l'action de ces ondes, le cohéreur était rendu conducteur et fermait le circuit des bobines du relais; l'armature de celui-ci était alors attirée et fermait à son tour le circuit de la sonnerie et de l'enregistreur. Le marteau de la sonnerie, étant attiré, donnait un coup sur le timbre, puis sur le cohéreur qui cessait alors d'être conducteur; le circuit des bobines du relais n'étant plus fermé, la palette du relais reprenait sa position normale et ouvrait ainsi les circuits de la sonnerie et de l'enregistreur, et ainsi de suite, tant que durait la production d'ondes à proximité. Quand elle cessait, tous les organes du dispositif reprenaient la position de repos.

Tels sont, résumés brièvement, les travaux concernant les ondes électriques qui ont conduit à la télégraphie sans fil. Nous exposerons, dans le chapitre suivant, comment le dernier pas a été franchi, de telle sorte que les expériences de Hertz, entreprises uniquement au point de vue spéculatif et dans le but de vérifier les conceptions purement théoriques de Maxwell, ont eu cette conséquence inattendue de donner lieu, au point de vue pratique, à une application dont l'importance n'est pas à démontrer.

CHAPITRE III

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE D'UNE STATION DE TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, les expériences de Popoff avaient uniquement pour but l'étude de l'électricité atmosphérique. Ce n'est que plus tard qu'il tenta à son tour d'appliquer les propriétés des ondes hertziennes à la transmission des signaux, bien que, dès 1895, il eût émis l'idée que l'appareil installé par lui pour déceler le caractère oscillatoire des décharges atmosphériques pouvait également enregistrer des signaux Morse, transmis par un *ondulateur assez puissant*.

Reprenons en effet le dispositif de la figure 9 ; plaçons comme enregistreur, en E, un appareil Morse et supposons que les ondes reçues sur le fil vertical aient été créées artificiellement au moyen d'un excitateur placé à distance. Si l'on produit, au poste transmetteur, des émissions longues ou courtes, reproduisant par leurs combinaisons les signaux de l'alphabet Morse, comme on le fait pour la télégraphie optique, ces signaux viendront s'enregistrer sur le morse récepteur et l'on aura réalisé une transmission télégraphique sans fil.

Toutefois, le problème n'était pas complètement résolu. Il fallait encore, comme l'avait indiqué Popoff lui-même, trouver un excitateur assez puissant pour faire franchir de grandes distances aux ondes hertziennes qui, dans toutes les expériences faites antérieurement, n'avaient pas dépassé les limites d'un laboratoire.

C'est M. Marconi, alors étudiant à l'université de Bo-

logne, qui, en 1896, réalisa le premier une communication par ondes hertziennes. Pour cela, il employait un récepteur analogue à celui de Popoff. Quant au transmetteur, il comprenait toujours un oscillateur de Hertz actionné par une bobine d'induction ; mais M. Marconi avait eu l'idée de lui adjoindre un fil vertical ou *antenne,* semblable à celui de l'appareil récepteur. Ce fil partait de l'une des boules de l'excitateur, dont l'autre boule était reliée à la terre. Grâce à cette disposition, M. Marconi put, dès le début, transmettre des signaux à 16 km. Nous verrons plus loin comment les perfectionnements successifs apportés aux appareils ont permis de franchir des distances beaucoup plus considérables.

Il résulte de ce qui précède que l'on peut résumer ainsi qu'il suit le principe de la transmission des signaux dans la télégraphie sans fil.

Si l'on produit des oscillations dans un conducteur métallique (antenne) dont l'extrémité supérieure est maintenue à une certaine distance du sol et dont l'extrémité inférieure est en communication avec le sol, ces oscillations transmettent à l'éther ambiant un mouvement vibratoire qui se propage dans toutes les directions, par ondes hertziennes.

Un conducteur métallique, analogue au précédent et placé à une distance convenable, se comportera comme un résonateur de Hertz et sera aussi le siège d'oscillations électriques. En produisant, d'une manière analogue à la télégraphie optique, des séries longues ou courtes d'oscillations dans l'antenne d'émission, on lancera dans l'espace des séries longues ou courtes d'oscillations hertziennes, c'est-à-dire de points et de traits représentant, par leurs combinaisons, les signaux Morse.

Ceux-ci seront reproduits par les oscillations qui prennent naissance dans l'antenne de réception et, si l'on dispose des instruments nécessaires, ils pourront être rendus perceptibles à nos sens.

Une station complète de télégraphie sans fil devra donc comprendre : les organes nécessaires à la production des oscillations, les organes nécessaires à la traduction en signes perceptibles à nos sens des oscillations reçues et enfin une antenne qui sera utilisée alternativement pour la transmission et pour la réception.

Le dispositif le plus simple est constitué schématiquement de la manière suivante.

Transmission. — Dans le système antenne-terre *at* (fig. 10), on intercale, au voisinage du sol, un oscillateur O. Celui-ci est relié aux bornes du circuit secon-

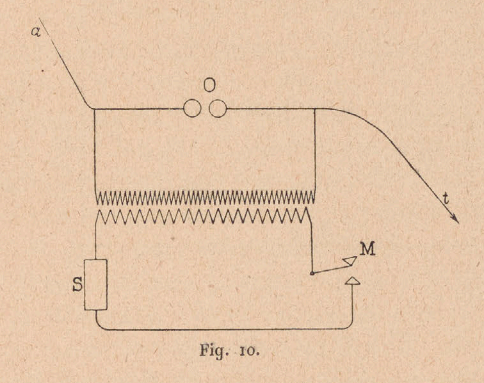


Fig. 10.

daire d'une bobine d'induction, dans le circuit primaire de laquelle est intercalée une clef Morse M, ainsi qu'une source d'électricité S.

L'antenne et le sol constituent ainsi les armatures d'un condensateur entre lesquelles est placé l'oscillateur. Ce condensateur est chargé à chacune des interruptions de l'interrupteur de la bobine ; lorsque la différence de tension entre les deux armatures atteint une valeur suffisamment élevée, le condensateur se décharge et la décharge est oscillante.

L'antenne sera donc le siège d'oscillations énergiques et, si l'on ferme plus ou moins longtemps, au moyen de

la clef Morse, le circuit primaire de la bobine, on produit dans l'antenne des séries longues ou courtes d'oscillations et par suite, dans l'espace, des signaux Morse en ondes hertziennes.

Réception. — Le poste récepteur comprend comme organe essentiel un cohéreur C (fig. 11), dont les électrodes sont reliées, d'une part à l'antenne *a* et à la terre *t*, et d'autre part aux extrémités d'un circuit contenant : un élément de pile P′, un relais R et deux bobines de

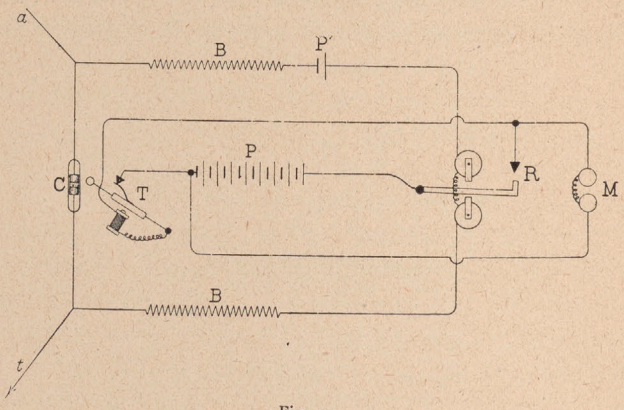


Fig. 11.

self-induction BB. Le contact du relais commande deux autres circuits comprenant, dans une partie commune, une pile de quelques éléments P et le contact du relais et contenant, en outre, l'un un trembleur T destiné à décohérer le tube de Branly, l'autre un appareil Morse M.

Les oscillations développées dans l'antenne par l'état vibratoire de l'éther ambiant ne peuvent suivre le circuit dérivé du relais, en raison de l'impédance des deux bobines de self-induction BB ; elles agissent alors sur le cohéreur et le rendent conducteur. Le courant de la pile P′ peut donc passer et actionner le relais qui ferme les circuits du morse et du trembleur. Le marteau

frappe aussitôt le tube de Branly et le décohère : le courant cesse de passer dans les bobines du relais, et la palette, revenant au repos, ouvre les circuits du morse et du trembleur, en rétablissant les choses dans leur état primitif.

Si des oscillations continuent à se produire dans l'antenne, le cohéreur est de nouveau actionné aussitôt après le choc du marteau : d'où nouvelle attraction de la palette du relais et fermeture des circuits du morse et du trembleur ; et ainsi de suite, tant qu'il se produira des oscillations dans l'antenne, c'est-à-dire tant que le poste transmetteur enverra des ondes électriques.

Quand celles-ci cesseront, le cohéreur ne sera plus actionné après le choc du marteau, et les circuits du trembleur et du morse resteront ouverts.

On voit d'après cela que, si le transmetteur envoie une longue série d'ondes, cette série sera en réalité traduite sur la bande du morse par une série de points, correspondant à chacun des contacts de la palette du relais.

Cette série de points est transformée en un trait continu, par l'artifice suivant. Un shunt de grande résistance est placé en dérivation sur le contact du relais, de sorte que, même quand ce contact est ouvert, un courant faible continue à passer dans les bobines du morse. Les noyaux du morse conservent donc en permanence une certaine aimantation qui, jointe à l'inertie de la palette, empêche celle-ci de se relever dans l'intervalle des points rapprochés produits par les contacts successifs du relais.

Si le transmetteur envoie une série courte, on aura sur la bande un trait court représentant un point.

Les points et les traits des signaux Morse, produits par le manipulateur du transmetteur, seront donc enregistrés sur la bande du récepteur comme dans une installation télégraphique ordinaire.

CHAPITRE IV

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES — ONDES STATIONNAIRES

Dès le début de la télégraphie sans fil, on a essayé de se rendre compte de l'état électrique de l'antenne d'émission. Mais le montage employé ne donnant pas naissance à des phénomènes suffisamment nets, les tâtonnements furent assez longs. Cependant, on était parvenu à se rendre compte que l'on avait un maximum de tension et un minimum d'intensité au sommet de l'antenne de transmission, avec l'inverse au sol. Le phénomène est comparable à celui qui se passe dans les tuyaux sonores, et la hauteur de l'antenne représenterait alors le quart de la longueur d'onde des oscillations qui peuvent être transmises par cette antenne.

Ces résultats peuvent être déduits du calcul, à la condition toutefois d'admettre un certain nombre d'hypothèses dont la légitimité est loin d'être démontrée et qui n'ont d'autre objet que de faciliter l'établissement des formules. C'est ainsi, par exemple, que l'on applique aux oscillations électriques les lois de la propagation des courants alternatifs. Il n'est pas douteux que les phénomènes qui se passent dans une antenne reliée à un oscillateur ne soient plus complexes que ceux qui se rapportent au régime périodique permanent, tel qu'on le considère ordinairement dans les applications industrielles.

Il n'est donc pas étonnant que les résultats du calcul ne soient pas toujours rigoureusement d'accord avec l'expérience, et il convient de les considérer seulement comme une première approximation.

Soit un fil conducteur rectiligne indéfini dont nous désignerons respectivement par r, l, g la résistance, la self-induction et la capacité par unité de longueur. Si ce conducteur est le siège de courants variables, le potentiel v à l'instant t, en un point situé à une distance z d'un point fixe pris pour origine, est à la fois fonction de z et de t, et il en est de même de l'intensité i au même point.

Considérons dans le fil deux sections situées à des distances z et $z + dz$ de l'origine. La quantité d'électricité qui a traversé la section z pendant le temps dt est idt, celle qui a traversé la section $z + dz$ pendant le même temps est $\left(i + \frac{di}{dz} dz\right) dt$, ce qui revient à dire que pendant le temps dt, la charge de l'élément dz a varié de $-\frac{di}{dz} dz\, dt$.

Or, pendant le même temps, le potentiel de dz, dont la capacité est gdz, a augmenté de $\frac{dv}{dt} dt$. On aura donc :

$$-\frac{di}{dz} dz\, dt = gdz \frac{dv}{dt} dt$$

ou

$$-\frac{di}{dz} = g \frac{dv}{dt}. \qquad (23)$$

D'autre part, si l'on considère le potentiel v comme une fonction de z, la chute de potentiel dans l'élément dz est $-\frac{dv}{dz} dz$. Outre la force électromotrice représentée par cette chute de potentiel, l'élément dz contient encore la force électromotrice due à la self-induction $-ldz \frac{di}{dt}$. Comme d'ailleurs la résistance de l'élément est rdz, on a pour l'équation du courant :

$$-\frac{dv}{dz} dz - ldz \frac{di}{dt} = irdz$$

ou

$$-\frac{dv}{dz}=ri+l\frac{di}{dt}. \qquad (24)$$

On obtiendra donc l'équation qui régit les variations du potentiel en éliminant i entre (23) et (24).

Différentions (23) par rapport à t et (24) par rapport à z; on aura :

$$-\frac{d^2i}{dz\,dt}=g\frac{d^2v}{dt^2}$$

$$-\frac{d^2v}{dz^2}=r\frac{di}{dz}+l\frac{d^2i}{dz\,dt},$$

d'où

$$\frac{d^2v}{dz^2}-rg\frac{dv}{dt}-lg\frac{d^2v}{dt^2}=0. \qquad (25)$$

Cette équation est ordinairement désignée sous le nom d'*équation des télégraphistes*. Dans le cas particulier où v est une fonction périodique, l'intégration peut se faire facilement.

Supposons que v soit de la forme :

$$v=A\sin\omega t+B\cos\omega t,$$

A et B étant des fonctions de z à déterminer. Écrivons que cette valeur satisfait à l'équation (25) :

$$\frac{d^2A}{dz^2}\sin\omega t+\frac{d^2B}{dz^2}\cos\omega t-rg(\omega A\cos\omega t-\omega B\sin\omega t)$$
$$+\omega^2 lg(A\sin\omega t+B\cos\omega t)=0.$$

Cette relation devant être satisfaite quel que soit t, on égalera à 0 les coefficients de $\sin\omega t$ et $\cos\omega t$, ce qui donnera deux équations pour déterminer A et B :

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d^2A}{dz^2}+\omega grB+\omega^2 lgA=0\\&\frac{d^2B}{dz^2}-\omega grA+\omega lgB=0.\end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

Posons

$$y = A + B\sqrt{-1}$$

et ajoutons les deux équations (26) après avoir multiplié les termes de la seconde par $\sqrt{-1}$; il viendra :

$$\frac{d^2y}{dz^2} + (\omega^2 lg - \omega gr\sqrt{-1})\, y = 0.$$

C'est une équation linéaire à coefficients constants, dont l'intégrale générale est :

$$y = Pe^{\rho_1 z} + Qe^{\rho_2 z}, \qquad (27)$$

P et Q étant des constantes d'intégration à déterminer d'après les conditions initiales, ρ_1 et ρ_2 étant les racines de l'équation caractéristique :

$$\rho^2 + \omega^2 lg - \omega gr\sqrt{-1} = 0.$$

Posons

$$\rho_1 = -\rho_2 = p + q\sqrt{-1},$$

on aura

$$\rho_1^2 = p^2 - q^2 + 2pq\sqrt{-1} = -\omega^2 lg + \omega gr\sqrt{-1},$$

d'où

$$p^2 - q^2 = -\omega^2 lg$$

$$2pq = \omega gr.$$

Et en remarquant que :

$$(p^2 + q^2)^2 = (p^2 - q^2)^2 + 4p^2q^2 = \omega^4 l^2 g^2 + \omega^2 g^2 r^2,$$

on a

$$p^2 + q^2 = \omega g\sqrt{r^2 + \omega^2 l^2} = \omega g d,$$

en désignant par d le radical $\sqrt{r^2 + \omega^2 l^2}$ ou l'impédance par unité de longueur.

On en déduit :

$$\left.\begin{aligned} p^2 &= \frac{\omega g}{2}(d - \omega l) \\ q^2 &= \frac{\omega g}{2}(d + \omega l). \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

L'équation (27) peut s'écrire :

$$y = \mathrm{P}e^{pz}e^{qz\sqrt{-1}} + \mathrm{Q}e^{-pz}e^{-qz\sqrt{-1}}$$

ou, en appliquant la formule d'Euler :

$$y = \mathrm{P}e^{pz}(\cos qz + \sqrt{-1}\sin qz) + \mathrm{Q}e^{-pz}(\cos qz - \sqrt{-1}\sin qz),$$

d'où

$$\mathrm{A} = (\mathrm{P}e^{pz} + \mathrm{Q}e^{-pz})\cos qz$$

$$\mathrm{B} = (\mathrm{P}e^{pz} - \mathrm{Q}e^{-pz})\sin qz,$$

ce qui donne enfin pour le potentiel v :

$$v = \mathrm{P}e^{pz}\sin(\omega t + qz) + \mathrm{Q}e^{-pz}\sin(\omega t - qz). \quad (29)$$

Le calcul de l'intensité se fera de la même manière. Si l'on élimine v entre (23) et (24), on obtient l'équation des télégraphistes dans laquelle i est l'inconnue :

$$\frac{d^2i}{dz^2} - rg\frac{di}{dt} - lg\frac{d^2i}{dt^2} = 0.$$

On en déduira comme ci-dessus :

$$i = \mathrm{P}'e^{pz}\sin(\omega t + qz) + \mathrm{Q}'e^{-pz}\sin(\omega t - qz). \quad (30)$$

Lorsque le conducteur est indéfini, le potentiel et l'intensité doivent décroître quand z augmente et, par suite, les termes qui contiennent e^{pz} doivent être nuls. Mais il n'en est plus de même si la longueur du fil est limitée ; après avoir atteint l'extrémité isolée, l'onde est réfléchie et revient en arrière, de sorte qu'en chaque point, le po-

tentiel et l'intensité peuvent être considérés comme résultant de la superposition de deux ondes se propageant en sens inverse. C'est ce qu'indiquent alors les équations (29) et (30).

La vitesse de propagation, qui est la même pour les deux ondes, est égale à $\frac{\omega}{q}$, et le facteur exponentiel montre qu'il y a amortissement. Dans le cas particulier qui nous occupe, on peut, en raison de la faible longueur de l'antenne, négliger cet amortissement, ce qui revient à faire $p=0$.

Les équations (28) donnent alors :

$$d - \omega l = 0$$

$$r = 0.$$

C'est-à-dire que le fil est considéré comme un conducteur parfait. On sait que cette hypothèse est permise dans le cas des vibrations très rapides.

On a alors :

$$q^2 = \omega^2 lg$$

et la vitesse de propagation se réduit à :

$$\frac{\omega}{q} = \frac{1}{\sqrt{lg}}.$$

Quant aux équations (29) et (30), elles deviennent :

$$v = \mathrm{P} \sin(\omega t + qz) + \mathrm{Q} \sin(\omega t - qz)$$

$$i = \mathrm{P}' \sin(\omega t + qz) + \mathrm{Q}' \sin(\omega t - qz).$$

Écrivons maintenant que ces valeurs de v et de i satisfont à la relation (23). On aura :

$$\frac{di}{dz} = q\left[\mathrm{P}' \cos(\omega t + qz) - \mathrm{Q}' \cos(\omega t - qz)\right]$$

$$-g\frac{dv}{dt} = -\omega g\left[\mathrm{P} \cos(\omega t + qz) + \mathrm{Q} \cos(\omega t - qz)\right].$$

La relation (23) devant être satisfaite quelles que soient les valeurs de z et de t, on aura :

$$P' = -\frac{\omega g}{q} P$$

$$Q' = \frac{\omega g}{q} Q.$$

Appliquons maintenant ces résultats à une antenne reliée au sol par son extrémité inférieure que nous prendrons pour origine. Pour $z = 0$, on doit avoir constamment $v = 0$, ce qui donne :

$$P + Q = 0$$

$$P' = Q'.$$

Les valeurs de v et de i deviennent alors :

$$v = 2 P \sin qz \cos \omega t$$

$$i = -\frac{2 \omega g}{q} P \cos qz \sin \omega t.$$

C'est-à-dire que l'on a des ondes stationnaires donnant des nœuds, pour le potentiel, aux points où $\sin qz = 0$ et, pour l'intensité, aux points où $\cos qz = 0$. On voit de plus que l'intensité est en *avance* d'un quart de période sur le potentiel.

Soit maintenant a la longueur totale de l'antenne. Pour $z = a$, on doit avoir $i = 0$. Il faut donc que $\cos qa$ soit nul, c'est-à-dire que qa soit un multiple impair de $\frac{\pi}{2}$. Prenons :

$$qa = \frac{\pi}{2}.$$

La vitesse de propagation dans le conducteur est $\frac{\omega}{q}$ et

la durée d'une vibration est $\frac{2\pi}{\omega}$. Il en résulte que la longueur d'onde λ a pour valeur $\frac{2\pi}{q}$, d'où :

$$a = \frac{\lambda}{4}.$$

D'une manière générale, si l'on donne à qa les valeurs $\frac{\pi}{2}$, $3\frac{\pi}{2}$, $5\frac{\pi}{2}$..., on obtiendra pour les longueurs d'onde correspondantes $4a$, $\frac{4a}{3}$, $\frac{4a}{5}$...

Une antenne reliée au sol peut donc être comparée à un tuyau fermé donnant un son fondamental ou ses divers harmoniques. Dans ce cas, on a toujours, pour le potentiel, un nœud à l'extrémité inférieure et un ventre au sommet. L'inverse a lieu pour l'intensité.

Supposons maintenant l'antenne isolée à ses deux extrémités. Pour $z = 0$ on doit avoir $i = 0$, d'où :

$$P' + Q' = 0$$

$$P - Q = 0$$

et les formules deviennent :

$$v = 2 P \cos qz \sin \omega t$$

$$i = -\frac{2\omega q}{q} P \sin qz \cos \omega t.$$

Or, au sommet, c'est-à-dire pour $z = a$, on doit avoir $i = 0$; donc sin qa est nul et par suite qa est un multiple de π.

On verrait comme ci-dessus que pour $qa = \pi$ on a :

$$a = \frac{\lambda}{2},$$

et en donnant à qa les valeurs successives π, 2π, 3π...,

on obtient pour les longueurs d'onde correspondantes $2a$, $4a$, $6a$...

Dans ce cas, l'antenne se comporte comme un tuyau ouvert et elle présente à chaque extrémité un ventre de tension avec un nœud d'intensité.

On peut aussi produire des ondes stationnaires dans un circuit fermé. Considérons un circuit fermé de longueur a et supposons qu'un point O de ce circuit soit soumis à un ébranlement périodique. Cet ébranlement se propagera dans les deux sens en donnant deux ondes symétriques représentées par les équations (29) et (30).

Nous remarquerons tout d'abord que si le mouvement oscillatoire subsiste dans le circuit sans altération, cela ne peut avoir lieu que si, après avoir parcouru le circuit de longueur a, chaque onde se retrouve identique à elle-même en passant au point O, c'est-à-dire que la longueur d'onde ou l'un de ses multiples doit être égale à a.

Prenons le point O comme origine des z, le potentiel et l'intensité seront pour ce point :

$$v = (P + Q) \sin \omega t$$

$$i = (P' + Q') \sin \omega t.$$

Or, à chaque instant, les deux ondes passant en O donneront pour le potentiel des valeurs égales et de signes contraires.

Il en résulte qu'au point O, v est constamment nul, d'où :

$$P + Q = 0$$

$$P' - Q' = 0.$$

Les formules deviennent donc :

$$v = 2P \sin qz \cos \omega t$$

$$i = -\frac{2\omega g}{q} P \cos qz \sin \omega t.$$

Dans ce cas, on a $qa = 2k\pi$. Le potentiel s'annule

aussi pour $z = \frac{a}{2}$, c'est-à-dire que l'on a des nœuds de tension en O et au point A diamétralement opposé.

Au contraire, l'intensité s'annule pour $z = \pm \frac{a}{4}$ et l'on a des nœuds aux extrémités du diamètre perpendiculaire à OA.

Vérifications expérimentales. — Ces divers résultats peuvent être vérifiés directement. La disposition la plus

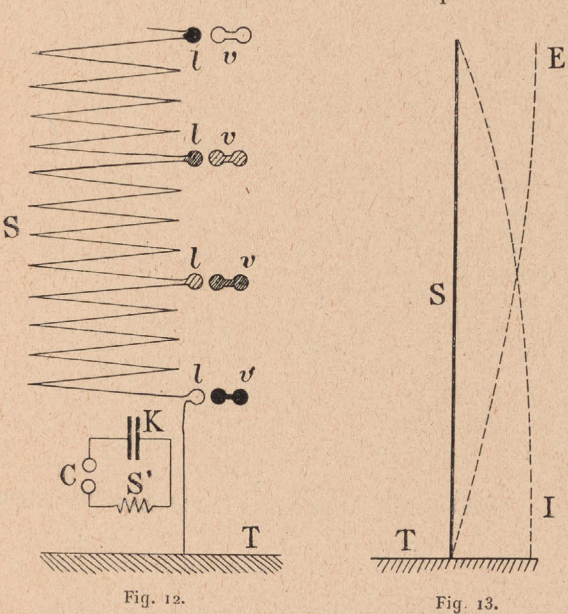


Fig. 12. Fig. 13.

simple consiste à former un solénoïde en enroulant un fil conducteur sur une cage en bois de 2 m de hauteur, dont la section est un carré de 50 cm de côté. Les spires sont écartées de 1 cm et, toutes les dix spires environ, une lampe à incandescence est intercalée dans le circuit. Si l'on produit des oscillations électriques dans un circuit voisin du solénoïde, celui-ci est à son tour le siège d'oscillations induites et, s'il est mis à la terre de manière à

représenter une antenne, on constate que les lampes situées à la partie inférieure s'allument. Leur éclat diminue à mesure qu'on s'élève, pour devenir nul au sommet, indiquant ainsi que l'intensité a sa valeur maxima à la base (fig. 12).

Si, maintenant, on place à côté de chaque lampe un tube à vide *v*, c'est l'inverse qui se produit : les tubes les

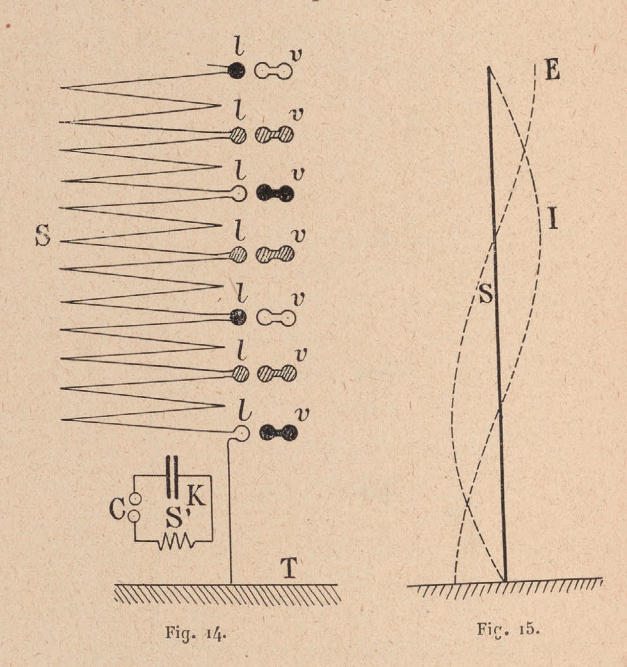


Fig. 14. Fig. 15.

plus brillants sont au sommet, indiquant un maximum de tension en ce point. On vérifie donc bien que le solénoïde est le siège d'un quart d'onde ainsi que l'indique la figure schématique 13.

En modifiant les éléments du circuit excitateur, on peut obtenir des harmoniques et constater par la position des nœuds et des ventres que le solénoïde vibre en $\frac{3}{4}$ ou $\frac{5}{4}$, etc., d'onde (fig. 14 et 15).

Le solénoïde étant isolé et maintenu ouvert, on le fait vibrer en demi-onde en l'excitant comme l'indique la figure 16. La répartition des nœuds et des ventres est indiquée par la figure 17.

On peut aussi obtenir les harmoniques inférieurs. Les figures 18 et 19 montrent le solénoïde donnant une onde complète. Dans ce cas, les deux extrémités du solénoïde

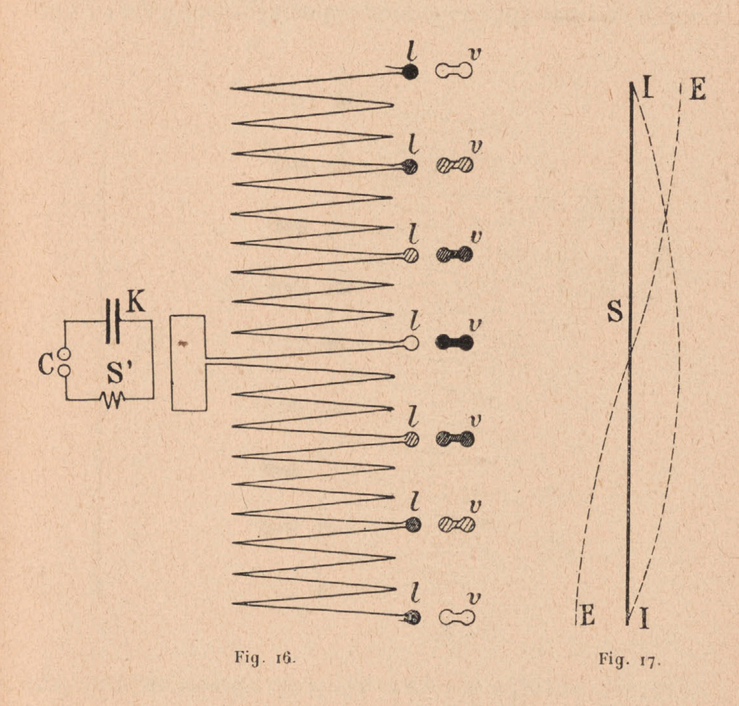


Fig. 16. Fig. 17.

étant à la même tension, on peut les réunir sans rien changer à l'onde stationnaire. C'est alors le cas du circuit fermé, que l'on peut reproduire comme l'indique la figure 20.

Dans toutes ces expériences, il convient de choisir les lampes à incandescence de manière à avoir un éclat suffisant. Des lampes de 8 à 10 volts conviennent très bien. Pour déceler les variations de tension, on peut remplacer

les tubes à vide par les étincelles qui se produisent entre les différentes spires et un objet métallique que l'on déplace à la main le long du solénoïde. Enfin, lorsque la place dont on dispose le permet, on peut développer le conducteur au lieu de l'enrouler en solénoïde. Les phénomènes sont alors plus nets.

Nous avons supposé jusqu'à présent la capacité et la self-induction uniformément réparties le long du circuit.

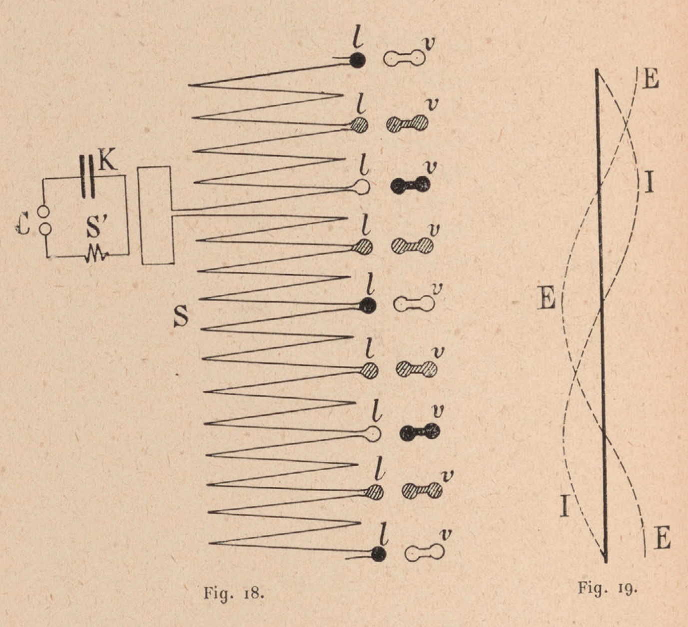


Fig. 18. Fig. 19.

Lorsque cela n'a pas lieu, les phénomènes ne sont plus les mêmes.

Considérons par exemple le cas d'un conducteur isolé de longueur *a*, dans lequel est intercalé un condensateur K (fig. 21). On a en K une variation brusque de tension, de sorte que le nœud n'est plus au milieu du conducteur. La longueur d'onde est donc plus faible que 2 *a*. Si l'on rapproche les armatures du condensateur, sa capacité augmente et la chute de potentiel en K diminue.

La longueur d'onde augmente alors et devient égale à 2 *a* lorsque la capacité est infinie, c'est-à-dire lorsque les armatures sont au contact, ce qui correspond au cas d'un fil continu. La limite inférieure correspond au cas où la capacité est nulle, c'est-à-dire au cas où le conducteur est coupé en deux parties vibrant respectivement avec leurs périodes propres.

Dans le cas d'un circuit fermé, l'introduction d'une

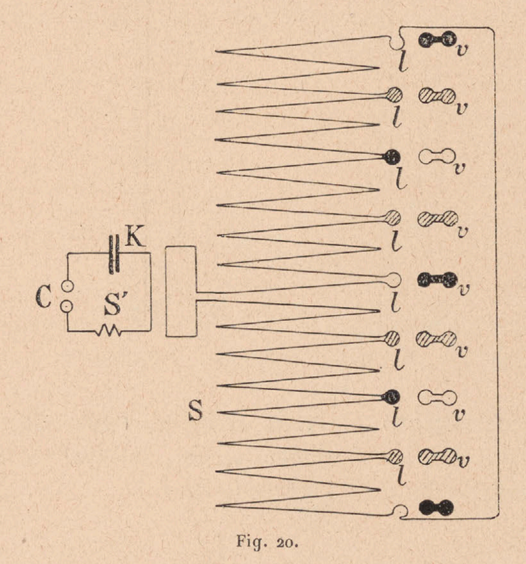


Fig. 20.

capacité notable fait disparaître l'onde stationnaire, et le mouvement vibratoire est alors celui qui a été étudié pages 26 et suivantes. L'intensité est alors constante.

L'introduction d'une self dans le circuit produit l'effet inverse (fig. 22). La longueur d'onde est alors supérieure à 2 *a* et la différence est d'autant plus grande que la valeur de la self est plus considérable. Lorsque la self devient trop grande, les oscillations ne peuvent la franchir et elle divise alors le conducteur en deux parties vibrant séparément, chacune avec sa période propre.

Ces remarques sont très importantes, car elles constituent le principe des dispositions employées pour le réglage des antennes.

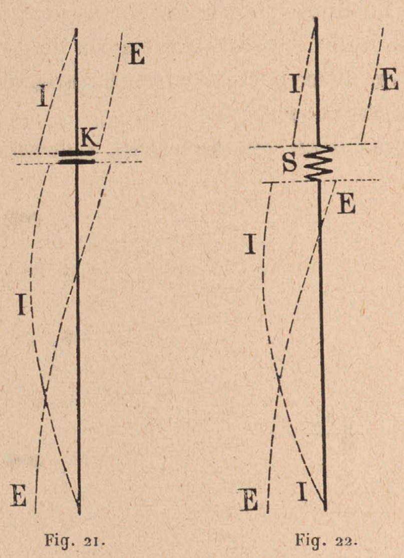


Fig. 21. Fig. 22.

Amortissement. — Nous avons vu (page 28) que la décharge d'un condensateur donne naissance à un courant oscillatoire dont l'intensité est :

$$i = \frac{Q_0}{mLC} e^{-\frac{Rt}{2L}} \sin mt. \qquad (31)$$

Cette formule montre qu'il y a amortissement dû à la résistance ohmique du circuit, celle-ci comprenant la résistance de l'étincelle.

Toutefois, cette cause d'amortissement n'est pas la seule. Il faut y joindre : l'hystérésis diélectrique du condensateur, l'échauffement de ce diélectrique, les pertes qui se produisent aux points où la tension admissible est dépassée (pointes, arêtes, etc.).

Enfin, une cause importante de la dissipation de l'éner-

gie est la dispersion des lignes de force dans l'espace. L'effet, faible dans les circuits fermés, devient au contraire très important dans les circuits ouverts et c'est lui qui représente le travail utilisé en télégraphie sans fil.

Ces diverses causes d'amortissement ont fait l'objet de nombreux travaux. Néanmoins, l'amortissement dû à la résistance ohmique est le seul qui ait été étudié d'une manière complète.

Désignons par i_1 i_2 i_3... les valeurs de l'intensité i aux instants $t, t + T, t + 2T$..., nous déduisons de l'équation ci-dessus :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{i_2}{i_3} = \cdots = e^{-\frac{RT}{2L}}$$

$$\log \frac{i_1}{i_2} = \log \frac{i_2}{i_3} = \cdots - \frac{RT}{2L} = \gamma.$$

L'expression $e^{-\frac{RT}{2L}}$ est appelée *facteur d'amortissement* et γ est le décrément logarithmique. La formule de Thomson donnant :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

on a :

$$\gamma = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Pour les courants continus ou les courants alternatifs à fréquence faible, les grandeurs R, L, C, sont sensiblement constantes dans un même circuit. Avec les oscillations à haute fréquence, il n'en est plus de même et ces grandeurs sont fonction de la rapidité des oscillations.

Considérons d'abord la résistance R. Elle se compose de deux parties, la résistance R_1 du conducteur et la résistance R_2 de l'étincelle. On a donc :

$$R = R_1 + R_2.$$

Lord Rayleigh a donné la formule suivante pour cal-

culer la résistance d'un conducteur par rapport aux oscillations, lorsqu'on connaît sa résistance ohmique R_0 :

$$R = R_0 \pi r \sqrt{\frac{m}{\rho}}.$$

Dans cette formule, r est le rayon du fil, m la fréquence et ρ la résistance spécifique. Pour le cuivre :

$$\sqrt{\rho} = 40.$$

Remarquons d'ailleurs que cette formule ne s'applique qu'aux conducteurs rectilignes ou enroulés suivant des courbes de grand diamètre.

En ce qui concerne la résistance R_2 de l'étincelle, on a reconnu que, pour une distance explosive et une différence de potentiel déterminées, la valeur de cette résistance augmente quand la capacité C diminue et quand la self-induction L augmente.

D'autre part, toutes choses égales d'ailleurs, R_2 augmente d'abord lentement avec la distance explosive, puis très vite. Il y a donc avantage à couper les longues étincelles en plusieurs parties.

La qualité du métal sur lequel jaillit l'étincelle a également une certaine influence sur la résistance. L'étain, le plomb, le zinc sont les métaux qui conviennent le mieux.

Enfin, d'après Zenneck, la résistance de l'étincelle varie comme l'inverse de l'intensité du courant.

D'autre part, la self-induction et la capacité varient avec la fréquence, de sorte que finalement l'équation (31) est loin d'être exacte. Toutefois, dans la pratique, on peut négliger les corrections relatives à la self et à la capacité. Il est nécessaire au contraire de tenir compte de celles qui concernent la résistance. On a reconnu que c'est la partie de la résistance relative à l'étincelle qui joue le rôle prépondérant dans l'amortissement.

Mesure de l'amortissement. — Pour mesurer l'amortissement, on mesure le décrément logarithmique γ. Diverses méthodes ont été proposées dans ce but (Rutherford, Zenneck, Drude, etc.); la plus employée est celle de Bjerkness, qui peut être résumée comme il suit (1).

Étant donné un circuit qui est le siège d'oscillations dont on veut mesurer l'amortissement, on installe dans

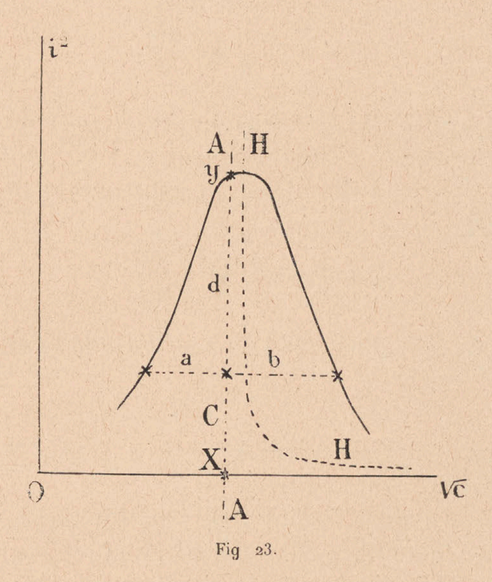


Fig 23.

son voisinage un deuxième circuit ayant une self L et une capacité C. On peut faire varier la capacité, et un ampèremètre thermique intercalé dans le circuit permet de mesurer l'intensité efficace correspondante I.

Construisons la courbe ayant pour abscisses les valeurs de $\sqrt{C}$ et pour ordonnées les valeurs de I^2. Cette courbe est appelée *courbe de résonance* (fig. 23). Le lieu des milieux des cordes horizontales de cette courbe est une

1. Tissot, *Thèse pour le doctorat.*

hyperbole équilatère, asymptote à l'axe des x et à une verticale qui coupe la courbe en un certain point. Soient XY les coordonnées de ce point, menons une corde horizontale quelconque et désignons par a, b, c, d les segments découpés par la courbe de résonance sur cette corde et sur l'asymptote.

On démontre que, si γ est le décrément du circuit à étudier, γ' celui du circuit variable, on a la relation :

$$\gamma + \gamma' = \frac{\pi}{X} \sqrt{\frac{abc}{d}}.$$

Si l'on modifie les éléments du circuit variable de manière à changer son amortissement et à lui donner une valeur γ'', on aura de même, en construisant une nouvelle courbe :

$$\gamma + \gamma'' = \frac{\pi}{X'} \sqrt{\frac{a'b'c'}{d'}}.$$

Enfin, on démontre que l'on a en outre la relation :

$$Y\gamma' (\gamma + \gamma') = Y'\gamma'' (\gamma + \gamma'').$$

On aura donc trois équations entre γ, γ' et γ'' d'où l'on pourra déduire la valeur de γ.

Lorsqu'on connaît le décrément logarithmique, on peut en déduire le nombre des oscillations produites par une décharge. Théoriquement, ce nombre est infini, mais dans la pratique on néglige les oscillations dont l'intensité est tombée au-dessous d'une certaine fraction, par exemple $\frac{1}{100}$, de l'intensité de la première oscillation. Dans ce cas, le nombre des oscillations de la décharge est, d'après Fleming :

$$n = \frac{4{,}605 + \gamma}{2\gamma}.$$

Suivant le même auteur, le décrément dans un circuit

fermé, employé pour l'excitation des antennes, est de l'ordre de 0,02 à 0,002. Au contraire, dans une antenne, il est de l'ordre de 0,2 à 0,4. Dans ce dernier cas, l'amortissement est dû presque exclusivement au rayonnement d'énergie qui constitue le travail utile.

Pour représenter l'amortissement dû à la radiation, Hertz a donné la formule suivante :

$$\delta = \frac{0{,}54}{\log \frac{4h}{d}},$$

dans laquelle h est la hauteur de l'antenne et d son diamètre. Les logarithmes employés dans cette formule sont les logarithmes ordinaires.

Ainsi, pour une antenne de 50 m faite en fil de 2,5 mm de diamètre, le décrément de radiation serait égal à 0,12.

Pour une antenne ordinaire chargée de manière à donner une étincelle de 5 mm, Fleming évalue à 10 la valeur du rapport du décrément dû à la radiation, au décrément dû à la résistance. Si nous considérons une antenne de capacité égale à $\frac{1}{5\,000}$ de microfarad, chargée cinquante fois par seconde à 15 000 volts, sa puissance serait de 1,25 watt. La puissance radiée ne serait donc que de 1 watt environ. On voit par là combien le rendement total est faible, car, pour obtenir la charge de l'antenne dans ces conditions, il faut dépenser 10 ampères sous 16 volts au primaire de la bobine, soit 160 watts. Le rendement total n'est donc que de 0,6 p. 100.

Mesure des longueurs d'onde. — Il convient de remarquer tout d'abord qu'un mouvement vibratoire ne peut être défini par sa *longueur d'onde* qu'à la condition de spécifier le milieu dans lequel les ondes se propagent. Il serait préférable, pour éviter toute confusion, de définir le mouvement vibratoire par sa *période*. L'habitude a prévalu de le désigner par sa longueur d'onde dans l'air.

La mesure des longueurs d'onde peut se faire par deux sortes de procédés ; les procédés directs et les procédés indirects.

Une première méthode consiste à mesurer ou à calculer les éléments, capacité et self-induction, du circuit qui sert à la production des ondes et à déduire la longueur d'onde de la formule de Thomson :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Si L et C sont mesurées en unités CGS, cette formule donnera T en secondes. Il en serait d'ailleurs de même si L et C étaient évaluées en unités pratiques, puisque l'unité pratique de self-induction vaut 10^9 unités CGS et que l'unité pratique de capacité vaut 10^{-9} unités CGS.

On a alors pour longueur d'onde :

$$\lambda = uT = 2\pi\sqrt{LCu^2}.$$

Si nous prenons, pour la vitesse de propagation u la valeur 3×10^{10}, le produit Cu^2 n'est autre chose que la capacité en unités électrostatiques. On peut donc écrire :

$$\lambda = 2\pi\sqrt{LC},$$

à la condition d'exprimer L en unités CGS électromagnétiques et C en unités CGS électrostatiques. Comme u représente alors la vitesse de la lumière en centimètres par seconde, cette formule donne la longueur d'onde λ en centimètres.

Le plus souvent on est obligé de mesurer directement les quantités C et L. C'est seulement pour des circuits de formes très simples que ces quantités peuvent être calculées en fonction des dimensions du circuit.

On peut aussi mesurer directement la période par la méthode du miroir tournant et en déduire la longueur d'onde. Pour cela, on place, devant l'étincelle du circuit oscillant à mesurer, un miroir tournant à une très grande

vitesse, qui renvoie l'image de l'étincelle sur une plaque photographique. Cette image est alors décomposée en plusieurs traits équidistants, correspondant à chacune des oscillations ; connaissant la vitesse de rotation du miroir, sa distance à la plaque photographique et la distance de deux traits consécutifs, on en déduit facilement le temps qui s'est écoulé entre les deux, c'est-à-dire la période. Ce procédé a été employé par Feddersen, Descombes, Tissot.

Il est généralement plus facile d'employer des procédés indirects pour la mesure des longueurs d'onde. Ces procédés consistent à mettre en résonance, avec le circuit

Fig. 24.

étudié, un autre circuit dont les formes géométriques rendent facile le calcul des éléments, capacité et self-induction, et par suite de la longueur d'onde, ou bien un autre circuit qui a été préalablement étalonné.

Le problème de la mesure des longueurs d'onde revient donc à constituer des circuits étalons dont on peut déterminer facilement les éléments ou la longueur d'onde.

Le plus simple est évidemment un circuit linéaire. On peut, comme nous l'avons fait dès 1901, prendre un fil linéaire horizontal placé à une hauteur assez grande pour que l'influence du sol soit négligeable.

Pour mesurer la longueur d'onde d'un circuit KSC (fig. 24), on le fait agir sur un fil horizontal coupé en son milieu par un ampèremètre thermique H.

En allongeant progressivement de quantités égales chacune des moitiés de L, on constate que l'intensité indiquée par l'ampèremètre augmente peu à peu jusqu'à

un certain maximum, puis diminue pour augmenter de nouveau et ainsi de suite. La différence des longueurs totales du fil qui correspondent à deux maximums consécutifs de l'intensité est évidemment égale à la longueur d'onde. Plus simplement, la longueur d'onde est égale au double de la longueur totale du fil qui correspond au premier maximum.

Ce procédé n'est pratique que pour des longueurs

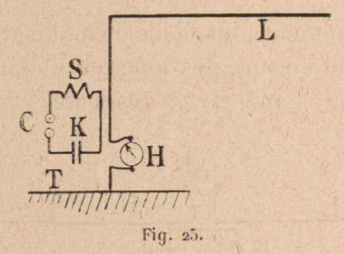


Fig. 25.

d'onde courtes. On peut d'ailleurs le simplifier en remplaçant une des moitiés du fil par une mise à la terre (fig. 25).

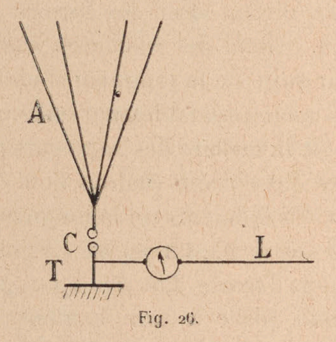


Fig. 26.

Dans le cas où le circuit à mesurer est une antenne A, on peut placer le fil horizontal L (fig. 26) en dérivation en un point voisin de la prise de la terre.

Ce procédé a été également employé par Slaby, mais il résulte des travaux de Wien et de Drude que son approximation n'est que de l'ordre de 6 à 10 p. 100.

Drude a montré qu'il était préférable de placer les deux fils de la figure 24 parallèlement (fig. 27), sauf à les replier lorsque les longueurs deviennent trop grandes. Deux ponts *p* et *p'* réunissent les deux fils, *p* est fixe, *p'* mobile. Le circuit à mesurer étant placé à proximité de *p*, on déplace *p'*, ainsi qu'un tube à vide V, placé au

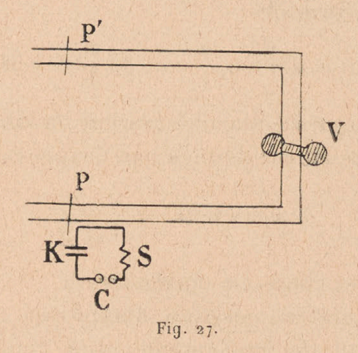


Fig. 27.

milieu de l'intervalle de *p* à *p'*, jusqu'à ce que la luminescence soit maximum. La longueur d'onde est alors égale à la longueur totale des deux fils et des deux ponts.

Lorsque les longueurs d'onde deviennent trop grandes

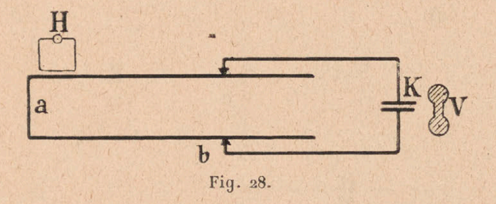


Fig. 28.

pour que l'on puisse faire usage de circuits linéaires pour les mesures, on emploie des circuits contenant une self et une capacité telles qu'elles soient faciles à calculer ou à mesurer.

Drude a proposé l'emploi d'un circuit rectangulaire allongé, dont les grands côtés peuvent être diminués ou augmentés au moyen de coulisses ; ce circuit est fermé sur un condensateur à air. Les résonances sont reconnues

soit par l'emploi d'un tube à vide V placé près du condensateur (fig. 28), soit au moyen d'un circuit auxiliaire contenant un ampèremètre thermique H ou un thermo-galvanomètre.

Soient b la longueur du grand côté du rectangle, a celle du petit côté, r le rayon du fil. La self de l'ensemble est donnée par la formule :

$$L = 4(a+b)\left[\log_e \frac{a}{r} - 1{,}31\,\frac{a}{b} + 1{,}06\left(\frac{a}{b}\right)^2\right].$$

Si C est la capacité du condensateur, la longueur d'onde d'un pareil circuit est donnée par l'expression :

$$\lambda = 2\pi\sqrt{LC} + \frac{\pi}{3}\,\frac{b^2}{\sqrt{LC}}$$

(L et C sont exprimés en centimètres).

Il est évidemment possible d'employer, dans le même but, des circuits de forme quelconque, faciles à calculer.

Voici quelques formules permettant de calculer la self-induction de circuits de forme simple dans l'air[1].

1. Pour les formes de circuit un peu complexes, il est préférable de mesurer la self-induction. Fleming recommande la méthode suivante : on constitue un pont de Wheatstone (fig. 29) dont trois branches sont for-

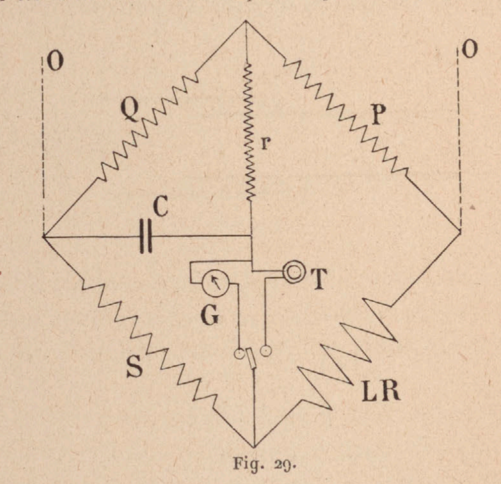


Fig. 29.

Self-induction d'un fil linéaire de longueur l et de rayon r :

$$L = 2\,l\,(\log_e \frac{2\,l}{r} - 1).$$

---

mées par des résistances non inductives PQS ; la quatrième branche est occupée par l'inductance à mesurer LR.

Sur une des diagonales se trouve placée une résistance variable r et un galvanomètre G, celui-ci pouvant être remplacé par un téléphone T. Un condensateur C est placé entre un des sommets du pont et une borne du galvanomètre.

Par la deuxième diagonale OO, on peut amener au pont soit du courant continu, soit des courants variables produits par exemple par un interrupteur très rapide monté en série avec une batterie de piles.

On commence par mettre le galvanomètre en circuit et on équilibre le pont pour le courant continu, puis on remplace le galvanomètre par le téléphone, le courant continu par des courants vibrés, et on réduit au minimum le son perçu dans le téléphone en agissant sur r. D'après Andersen, on a :

$$L = \frac{C}{10^6}[r\,(R + S) + RQ]$$

Le pont ayant été équilibré pour le courant continu, on a :

$$\frac{P}{Q} = \frac{R}{S}$$

et par suite :

$$L = 10^3\,CS\,(r + r\frac{P}{Q} + P') \text{ en centimètres.}$$

Pour mesurer les capacités, on peut aussi employer le pont à téléphone

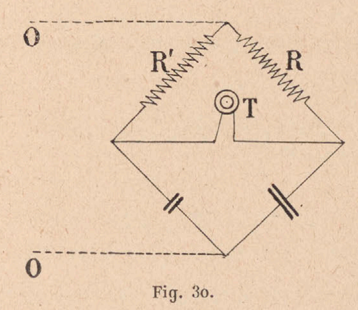


Fig. 30.

(fig. 30). C est une capacité étalon, RR' deux résistances, X le condensateur à mesurer, T un téléphone. Par OO parviennent des courants variables : on a :

$$X = \frac{CR'}{R}.$$

On peut également employer la méthode du commutateur tournant, avec un galvanomètre.

Self-induction de deux fils parallèles de longueur l, de rayon r, à une distance D :

$$L = 4\, l \log_e \frac{D}{r} \qquad \text{(Fleming)}$$

ou

$$L = 2\, l \left(4{,}606 \log_{10} \frac{D}{r} + \frac{1}{2}\right). \qquad \text{(Drude)}$$

Self-induction d'une spire carrée de côté a, en fil de rayon r :

$$L = 8\, a \left(2{,}303 \log_{10} \frac{8\,a}{r} - 2{,}853\right) \qquad \text{(Fleming)}$$

ou

$$L = 8\, a \left(\log_e \frac{a}{r} - 0{,}774\right) \qquad \text{(Zenneck)}$$

Dans le cas de basse fréquence, la constante 2,853 doit être remplacée par 2,6.

Self-induction d'un rectangle de côtés a et b, a étant le petit côté, r le rayon du fil :

$$L = 4(a+b)\left[\log_e \frac{a}{r} - 1{,}31 \frac{a}{b} + 1{,}06\left(\frac{a}{b}\right)^2\right]. \qquad \text{(Drude)}$$

Self-induction d'un cercle de longueur $l = 2\pi a$, le fil ayant un rayon r :

$$L = 2\, l \left(\log_e \frac{l}{r} - 1{,}758\right) \qquad \text{(Stephan)}$$

ou

$$L = 2\, l \left(\log_e \frac{2\,l}{r} - 2{,}45\right) \qquad \text{(Fleming)}$$

ou

$$L = 2\, l \left(\log_e \frac{8\,a}{r} - 2\right). \qquad \text{(Zenneck)}$$

Self-induction d'un solénoïde dont la longueur l est très grande par rapport au diamètre moyen D, soit N le nombre de spires par centimètre de longueur :

$$L = (\pi D N)^2\, l.$$

Self-induction d'une bobine de hauteur b, d'épaisseur c, de rayon moyen r, composée de N spires au total :

$$L = \frac{100\ N^2 r^2}{1{,}844\ r + 3{,}1\ c + 3{,}5\ b}, \qquad \text{(J. Perry)}$$

tout est exprimé en centimètres : L, r, c, b.

Ondamètres. — Il existe un assez grand nombre de types d'ondamètres.

Le type le plus simple est celui dans lequel le circuit de l'ondamètre est à capacité et à self uniformément réparties, comme dans le fil horizontal dont il a été parlé plus haut.

A cette catégorie appartient la *bobine multiplicatrice* de Slaby, qui se compose d'un bâton isolant sur lequel est enroulé en hélice un fil très fin terminé par une plaque de platinocyanure de baryum, qui devient lumineux quand la tension est élevée. On approche cette bobine du circuit à étudier et l'on déplace le long d'une génératrice un contact relié à la terre (fig. 31). Lorsque l'enroulement compris entre B et A représente un quart d'onde du circuit à étudier, l'extrémité A atteint son maximum de luminosité. La bobine est préalablement graduée par comparaison avec des circuits étalons, comme il a été dit plus haut.

A
B

Fig. 31.

Le *kummètre* de Fleming est analogue, mais les maximums de tension sont indiqués par un tube à vide ou un tube à néon. L'appareil est disposé de la manière suivante :

Le circuit à étudier étant K'c (fig. 32), on relie une extrémité d'une bobine B très allongée, en fil fin, à un point de ce circuit, par l'intermédiaire d'un condensateur K de très faible capacité. Un curseur A, relié à la terre, se déplace le long d'une génératrice de la bobine.

On cherche par tâtonnements, en déplaçant A, deux maximums consécutifs de tension, que l'on reconnaît au moyen de la luminosité du tube à vide V. La bobine est graduée à l'avance.

L'approximation des mesures faites au moyen de ces instruments ne dépasse pas 5 p. 100 en général, en raison

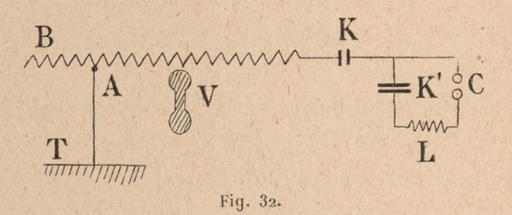


Fig. 32.

de l'incertitude de la position exacte des curseurs correspondant au maximum de luminosité. Pour obtenir une précision plus grande, on a recours aux ondamètres à capacité et self séparées. On peut constituer l'instrument soit avec une capacité variable et une self fixe, soit avec

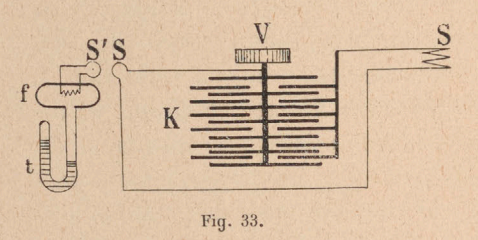


Fig. 33.

une capacité fixe et une self variable, soit avec self et capacité toutes deux variables.

L'ondamètre de Dœnitz comprend un condensateur variable K, analogue à un électromètre multicellulaire (fig. 33) dans lequel le déplacement des armatures se fait par rotation de l'axe des plateaux mobiles ; ce condensateur est mis en circuit avec une self S constituée par quelques spires serrées ensemble ; cette self est choisie plus ou moins grande suivant l'ordre de grandeur de la

longueur d'onde à mesurer. Le circuit ainsi constitué agit par induction sur une boucle de fil *s'* par l'intermédiaire d'une spire *s*. La boucle *s'* est fermée sur un fil fin *f* contenu dans un thermomètre à air de Riess. Suivant que l'énergie des oscillations du circuit KS*s* est plus ou moins grande, le fil *f* est plus ou moins chaud et la différence de niveau du liquide dans les deux branches du thermomètre augmente ou diminue. La vis à tête molettée V porte une aiguille qui se déplace le long d'un cadran gradué en longueurs d'onde ; il y a autant de graduations que l'on peut mettre de selfs différentes S.

Pour mesurer la longueur d'onde d'un circuit, on

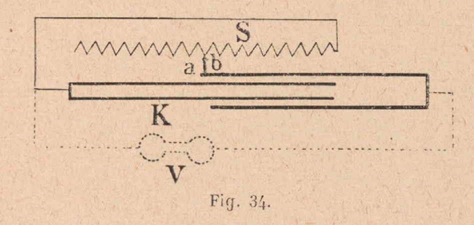


Fig. 34.

approche l'ondamètre de manière que la self S puisse être actionnée par lui.

Fleming a modifié le *kummètre* décrit plus haut, pour le cas où les ondes à mesurer ont une grande longueur : une self S (fig. 34) est variable au moyen d'un curseur fixé à une armature mobile d'un condensateur K, en forme de tube allongé. Le déplacement de cette armature mobile augmente ou diminue donc à la fois la capacité et la self-induction du circuit et l'appareil est construit de manière que les déplacements du curseur sont proportionnels aux variations de longueur d'onde du circuit.

L'appareil est soumis à l'action du circuit à mesurer, par un procédé analogue à celui que l'on emploie pour le kummètre. La résonance est reconnue au moyen de l'illumination d'un tube à néon *v* mis aux bornes du condensateur.

L'appareil que nous avons employé au début (1903) était constitué de la manière suivante : une self S est formée de larges spires carrées de 30 cm de côté et mise en circuit avec un ampèremètre thermique A et un condensateur variable K (fig. 35). Ce dernier comprend une armature fixe et une armature mobile glissant sur la surface des lames d'ébonite qui constituent le diélectrique. Un index permet de mesurer les déplacements de l'armature mobile. On approche l'appareil ainsi constitué du circuit à étudier, et on cherche la position de l'armature mobile qui correspond au maximum d'intensité

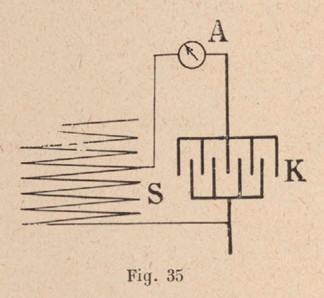


Fig. 35

indiqué par l'ampèremètre thermique. L'appareil ayant été gradué à l'avance au moyen d'un circuit étalon, on en déduit la longueur d'onde. On met en circuit plus ou moins de spires de la self S, suivant la longueur d'onde à mesurer.

Sous sa forme actuelle, l'ondamètre Ferrié est à condensateur fixe ou variable par sections, tandis que la self peut varier d'une façon continue. Ce dernier résultat est réalisé de la manière suivante.

Une couronne formée de 10 à 20 spires de fil bien isolé est placée à l'intérieur d'un tube de cuivre U replié en forme de tore et présentant en A une coupure par laquelle sortent les extrémités *a* et *b* de la couronne (fig. 36). Celle-ci doit remplir le tube aussi exactement que possible. Pour faciliter sa mise en place, le tube est fendu

en x (fig. 37) ; on peut aussi lui donner la forme d'une gouttière y.

L'un des bords c de la coupure est réuni au centre o

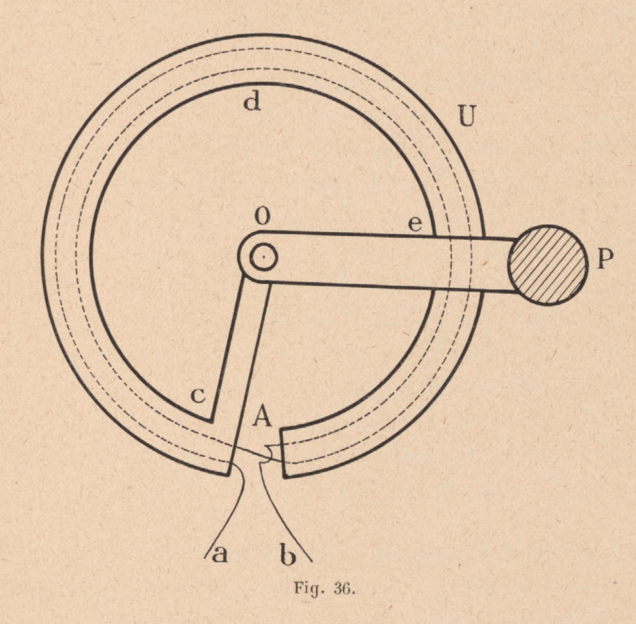
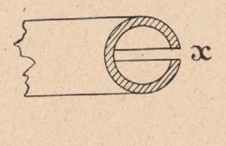


Fig. 36.

du cercle par une lame de cuivre fixe et autour du même centre peut tourner une lame mobile, également en



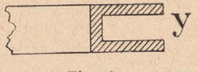


Fig. 37.

cuivre, qui s'appuie sur le tube en e; une manette P permet de faire varier sa position.

Lorsque des oscillations traversent les spires, elles

induisent d'autres oscillations dans la partie *cdeoc* du tube. Celui-ci se comporte alors comme le secondaire d'un transformateur mis en court-circuit, et la self apparente du primaire, c'est-à-dire des spires contenues dans le tube, se trouve diminuée. On peut la faire varier dans de larges limites (de 1 à 6 ou 10) en déplaçant le point de contact *e*, et la variation est continue.

L'ondamètre qui utilise ce principe comprend un condensateur K (fig. 38), un ampèremètre thermique A, la

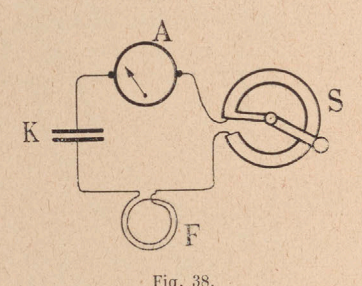


Fig. 38.

self variable S et deux spires F sur lesquelles on fait agir le circuit à mesurer. Cet appareil est simple et peu coûteux à établir.

On peut varier beaucoup les modèles d'ondamètres, tous ne valent que par le procédé qui a servi à les graduer. Mais, comme les divers procédés que l'on peut employer sont tous sujets à erreur, il en résulte que les divers ondamètres ne sont pas comparables entre eux. Il serait à désirer qu'un ondamètre étalon fût déposé auprès d'un bureau international, pour servir à la graduation des ondamètres de tous pays.

CHAPITRE V

THÉORIES DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Quel est maintenant le mécanisme par lequel s'effectue le transport d'énergie utilisé dans la télégraphie sans fil? Plusieurs théories ont été émises pour répondre à cette question. Certains auteurs ont admis qu'il y avait simplement induction électromagnétique entre les deux antennes ; d'autres n'ont vu qu'un effet de capacité électrostatique, d'autres encore, un effet de conduction par le sol ou une simple propagation des ondes hertziennes par l'air. Nous résumerons d'abord les plus intéressantes de ces théories.

Celle de M. Slaby est basée uniquement sur l'induction électromagnétique. Il admet que, si un fil de longueur l est le siège d'un courant dont l'intensité moyenne est J et la période T, l'intensité du courant induit dans un fil parallèle de même longueur, placé à une distance a, est :

$$j = \mathrm{K}\,\frac{l^2 \mathrm{J}}{a\mathrm{T}}.$$

La fréquence des oscillations étant très grande, T est très petit et la portée a peut alors être considérable.

La formule de M. Slaby a été établie pour deux antennes parallèles. Il en résulte que le raisonnement se trouverait en défaut lorsque les antennes, étant situées dans le même plan, forment chacune avec la verticale un angle de 45° ; car elles sont alors perpendiculaires. Néanmoins, on obtient encore d'excellentes communications dans ces conditions.

D'autre part, des antennes horizontales bien démasquées devraient être aussi efficaces que les antennes verticales, ce qui est contraire aux résultats de l'expérience.

D'après M. Andersen, le rôle principal en télégraphie sans fil serait joué par la capacité électrostatique des antennes, qui se comporteraient l'une par rapport à l'autre comme les deux armatures d'un condensateur.

La principale objection que l'on peut faire à cette théorie est que, si elle était vraie, l'intensité des effets devrait varier en raison inverse du cube des distances; les communications ne pourraient par suite être établies qu'à de très courtes distances. De plus, dans le cas de deux antennes de 60 m placées au niveau de la mer à une distance de 200 km, la ligne qui joint les sommets passe à 500 ou 600 m au-dessous du niveau de la mer. Il est bien difficile de se rendre compte de ce que peut alors représenter la capacité de ces deux antennes, entre lesquelles est intercalée une masse conductrice aussi considérable, faisant partie du circuit.

M. Broca admet que l'énergie utilisée est celle qui est concentrée le long de l'antenne. Or, d'après un théorème établi par Poynting, le flux d'énergie est dirigé normalement au plan qui contient les deux forces magnétique et électrique, et par conséquent se propage le long du fil. M. Broca admet qu'à l'extrémité de l'antenne, la force électrique reste normale au conducteur, tandis que la direction de la force magnétique est indéterminée. Il y aurait donc flux d'énergie dans un plan normal à la force électrique, c'est-à-dire qu'au sommet, le flux d'énergie se disperserait suivant une nappe horizontale.

Si ce raisonnement était exact, il suffirait de plier à 90° l'extrémité supérieure de l'antenne pour empêcher toute propagation: l'expérience démontre qu'il n'en est pas ainsi.

Étant donné qu'il existe autour de la terre des surfaces

équipotentielles du champ qu'elle produit, M. Blochmann suppose que la production d'oscillations dans une antenne verticale a pour effet de modifier ces surfaces équipotentielles. Ces perturbations se faisant encore sentir autour de l'antenne de réception, le potentiel de celle-ci sera également modifié et le cohéreur actionné. En réalité, cette théorie n'est autre chose que la théorie de la propagation des ondes hertziennes dans l'air.

La théorie de M. Villot est uniquement basée sur la conductibilité du sol, et son auteur fonde même sur cette conductibilité tout un nouveau système de télégraphie sans fil.

M. Righi ne donne pas, à proprement parler, la théorie des phénomènes qui interviennent dans la télégraphie sans fil. Il admet seulement, après M. Della Riccia, qu'il y a propagation d'ondes hertziennes et que celles-ci sont certainement réfléchies par le sol. L'effet produit sur l'appareil récepteur est celui qui résulte de l'interférence entre les ondes directes et les ondes réfléchies. Par suite, avec le dispositif ordinaire décrit plus haut, la réflexion des ondes complète en quelque sorte l'oscillation, en ajoutant à l'antenne existante son image électrique. Cette dernière idée avait déjà été émise par M. Blondel, comme on le verra ci-après.

Aucune des théories qui précèdent n'est satisfaisante, car toutes sont impuissantes à expliquer un plus ou moins grand nombre de faits constatés par l'expérience. Peut-être est-il encore prématuré de chercher à établir une théorie complète de la télégraphie sans fil, rendant compte de tous les faits connus et permettant d'en prévoir d'autres, car non seulement les phénomènes observés ne sont pas tous expliqués, mais chaque jour en amène de nouveaux. On ne peut guère que se borner, pour le moment, à les recueillir et à les classer, jusqu'à ce qu'ils soient assez nombreux pour permettre de formuler des lois et en déduire une théorie générale.

La théorie de M. Blondel, que nous allons exposer, n'est également qu'approchée. Elle a cependant l'avantage de ne s'appuyer que sur des propriétés connues des ondes hertziennes.

La façon la plus simple de représenter l'ébranlement produit dans l'éther par la vibration électrique de l'antenne est d'admettre que la propagation s'effectue sous la forme d'une onde hémisphérique polarisée, les lignes de force électriques étant des méridiens circulaires et les lignes de force magnétiques étant des cercles concentriques à l'antenne.

Cette hypothèse se concilie parfaitement avec les résultats trouvés par Hertz dans l'étude du champ autour d'une

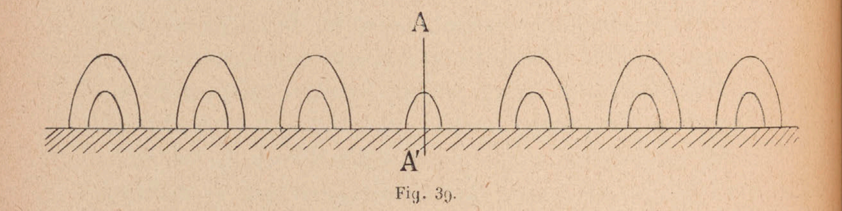


Fig. 39.

petite oscillation électrique rectiligne, bien que cela ait été contesté par certains auteurs anglais et américains, qui se représentaient les ondes comme des tores elliptiques de hauteur constante, glissant à la surface du sol et s'agrandissant seulement en diamètre (fig. 39).

Si l'on admet que la terre constitue un conducteur parfait, les ondes sont alors réfléchies par le sol et les choses se passent comme si l'on avait dans l'espace un oscillateur de Hertz formé par l'antenne OA et son image OA'.

Si l'on se reporte à la représentation de Hertz, on voit que le champ est formé d'une série de boucles qui se ferment d'abord sur l'antenne (fig. 40) puis sur elles-mêmes (fig. 41) et enfin se détachent en se transportant sous forme d'ondes libres, perpendiculairement à AA' (fig. 42).

En réalité, la présence de la terre ne laisse place qu'à la

moitié supérieure des boucles. Or, celles-ci ne restent pas semblables à elles-mêmes, car les lignes de force tendent à s'étendre dans toutes les directions. Elles augmentent

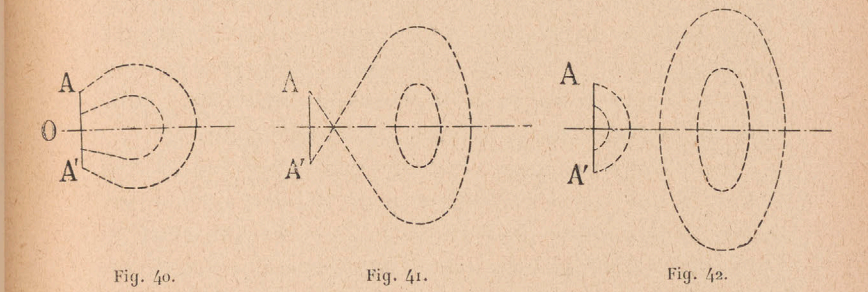


Fig. 40. Fig. 41. Fig. 42.

donc de hauteur, en même temps qu'elles se propagent à la surface de la terre qu'elles rencontrent normalement.

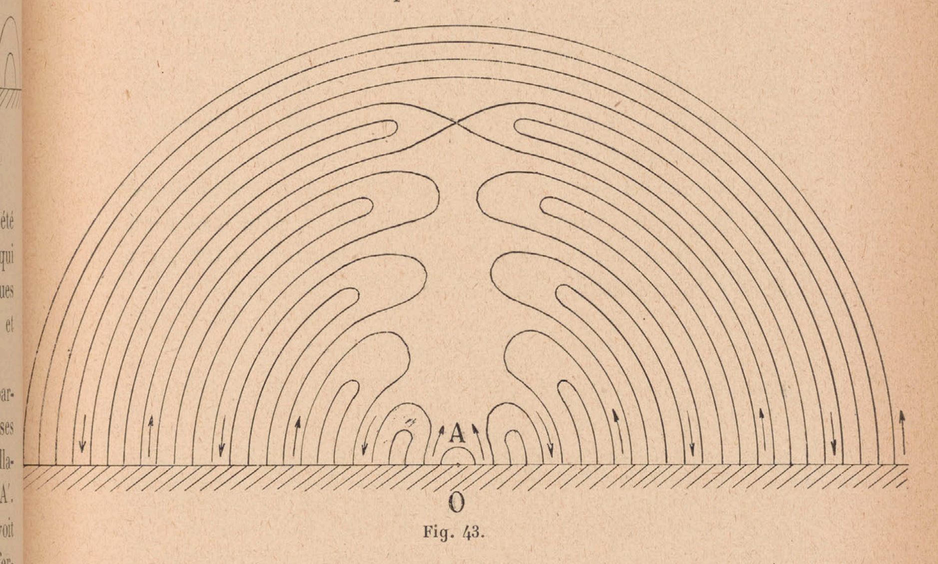


Fig. 43.

En même temps, elles s'incurvent vers l'axe vertical de l'antenne et finissent par se joindre (fig. 43).

A partir de ce moment, l'onde devient hémisphérique et la propagation se fait avec la vitesse de la lumière.

Quant aux lignes de force magnétiques, elles sont représentées par des cercles horizontaux ayant leurs centres sur l'antenne de transmission. Ces cercles s'élargissent de plus en plus et viennent couper l'antenne de réception, dans laquelle ils produisent une force électromotrice proportionnelle à la variation d'intensité du champ, en donnant naissance à une onde stationnaire semblable à celle qui est produite dans l'antenne de transmission.

Toutefois, cette force électromotrice n'est pas le seul élément qui soit à considérer pour la réception. Il faut aussi tenir compte de l'intensité, de sorte que c'est en définitive l'énergie reçue par l'antenne qui entre en jeu pour la réception et qu'il y a lieu de considérer pour déterminer la distance à laquelle la réception est encore possible, c'est-à-dire la portée d'une station donnée.

Or, bien que les ondes soient sphériques, comme elles sont en même temps polarisées, l'énergie n'est pas répartie d'une façon uniforme sur la surface d'onde. M. Blondel a montré, par le calcul suivant, comment se fait cette répartition.

Soit une antenne verticale de hauteur a, reliée au sol (fig. 44), dans laquelle on produit des oscillations électriques. Nous avons trouvé pour l'intensité en un point situé à la distance z du point O :

$$i = -\frac{2\omega g}{q} \mathrm{P} \cos qz \sin \omega t.$$

avec

$$qa = \frac{\pi}{2},$$

ou, en désignant par I l'amplitude de l'intensité au point O ($z = 0$) :

$$i = \mathrm{I} \cos qz \sin \omega t.$$

Prenons sur l'antenne un élément dz dans lequel l'intensité varie de di pendant le temps dt et considérons un point m de l'espace que nous pouvons prendre dans le

plan de la figure. Si nous supposons le courant i dirigé de bas en haut, la force magnétique en m est perpendiculaire au plan de la figure et dirigée vers l'arrière. D'autre part, mR est le vecteur radiant de Poynting. Il en résulte que la force électrique h au point m est dans le plan de la figure, perpendiculaire à zm et dirigée vers le bas.

Considérons maintenant un élément ds dirigé suivant mh. La variation d'intensité di produit en ds une force

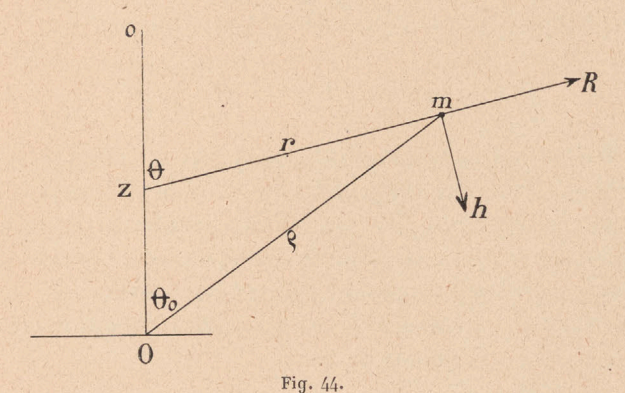


Fig. 44.

électromotrice d'induction, dont la valeur, donnée par la formule de Neumann, est :

$$\frac{di}{dt}\frac{\cos \varepsilon}{r}\, dz\, ds,$$

ε étant l'angle formé par les deux éléments et r leur distance.

Or la force électrique h n'est autre chose que la force électromotrice considérée, rapportée à l'unité de longueur. On aura donc, en remarquant que l'angle ε est le complément de $\theta = azm$:

$$h = \frac{di}{dt} \cdot \frac{\sin \theta}{r}\, dz.$$

Seulement, l'action de dz sur ds n'est pas instantanée et l'induction doit parcourir la distance r avec la vitesse $u = \frac{\omega}{q}$.

Il en résulte que, si l'on considère h à l'instant t, il faut prendre, pour l'intensité, la valeur de i à l'instant $t - \frac{r}{u}$, c'est-à-dire :

$$i = \mathrm{I} \cos qz \sin (\omega t - qr),$$

ce qui donne pour la force électrique élémentaire :

$$h = \omega \mathrm{I} \cos qz \cos (\omega t - qr) \frac{\sin \theta}{r} dz.$$

Pour avoir la force électrique H due à l'antenne tout entière, il faudrait intégrer les forces h produites par les éléments tels que dz. Le calcul complet serait assez compliqué ; mais on peut le simplifier en considérant seulement ce qui se passe à une grande distance de l'antenne. Dans ce cas en effet, on peut admettre que l'angle θ est constant et égal à $\theta_0 = m\mathrm{O}a$.

On prendra alors :

$$r = \rho - z \cos \theta_0,$$

ρ étant la distance $\mathrm{O}m$.

Si en outre on remplace $\frac{\sin \theta}{r}$ par $\frac{\sin \theta_0}{\rho}$, la valeur de h devient :

$$h = \frac{\omega \mathrm{I} \sin \theta_0}{\rho} \cos qz \cos [\omega t - q (\rho - z \cos \theta_0)] dz.$$

Nous avons dit que l'antenne reliée au sol peut être remplacée par un oscillateur de longueur double $2a$, formé par l'antenne et son image. De plus, toutes les composantes telles que h sont concordantes en direction. Il suffira donc, pour avoir H, d'intégrer l'expression ci-dessus entre $-a$ et $+a$.

Or on a :

$$\cos qz \cos(\omega t - qr) = \frac{1}{2}\cos(qz + \omega t - qr) + \frac{1}{2}\cos(qz - \omega t + qr),$$

dont l'intégrale par rapport à z est :

$$\frac{1}{2q(1+\cos\theta_0)}\sin(qz+\omega t - qr) + \frac{1}{2q(1-\cos\theta_0)}\sin(qz - \omega t + qr)$$

$$= \frac{1}{2q\sin^2\theta_0}[(1-\cos\theta_0)\sin(qz+\omega t - qr) + (1+\cos\theta_0)\sin(qz-\omega t+qr)]$$

$$= \frac{1}{q\sin^2\theta_0}[\sin qz\cos(\omega t - qr) - \cos\theta_0\cos qz\sin(\omega t - qr)].$$

Pour $z = \pm a$, on a :

$$\sin qz = \pm 1, \qquad \cos qz = 0, \qquad qa = \frac{\pi}{2},$$

d'où pour l'intégrale prise entre $-a$ et $+a$:

$$\frac{1}{q\sin^2\theta_0}\left[\cos\left(\omega t - q\rho + \frac{\pi}{2}\cos\theta_0\right) - \cos\left(\omega t - q\rho - \frac{\pi}{2}\cos\theta_0\right)\right]$$

$$= \frac{2}{q\sin^2\theta}\cos(\omega t - q\rho)\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta_0\right).$$

Donc enfin :

$$\int_{-a}^{+a} h = \mathrm{H} = \frac{2\,\mathrm{I}u}{r_0}\,\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta_0\right)}{\sin\theta_0}\cos(\omega t - q\rho).$$

Si l'on désigne par H′ la force magnétique au point m, les équations de Maxwell montrent que, dans le système électromagnétique, on a :

$$\mathrm{H} = u\mathrm{H}'.$$

D'autre part, il résulte du théorème de Poynting, cité plus haut, que l'énergie rapportée à l'unité de surface varie comme le produit HH′. Il en résulte qu'à une distance ρ suffisammen tgrande, si l'on fait varier l'angle θ_0, l'amplitude de l'énergie varie proportionnellement à :

$$\alpha = \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta_0\right)}{\sin^2\theta_0}.$$

On voit que l'énergie est maximum dans le plan équatorial $\left(\theta_0 = \frac{\pi}{2}\right)$ et nulle pour $\theta_0 = 0$, c'est-à-dire dans le prolongement de l'antenne. Si l'on porte sur des rayons vecteurs, tracés par exemple de 10 en 10 degrés, les valeurs correspondantes de α, on obtient la courbe représentée figure 45, qui montre que l'énergie décroît rapidement quand on s'élève au-dessus de l'horizon.

Cette dernière conséquence de la théorie de M. Blondel a été vérifiée par les expériences que nous avons faites en 1901 avec une antenne de réception suspendue à un ballon libre. Ces expériences ont nettement montré que

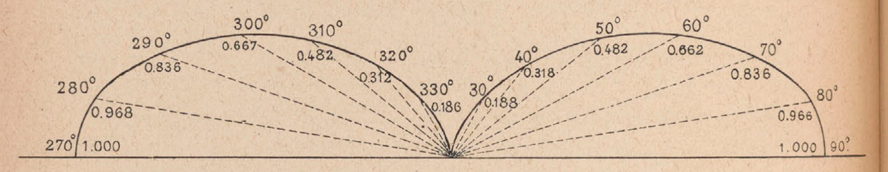


Fig. 45.

l'énergie était concentrée à la surface du sol sur une hauteur qui dépend de la hauteur de l'antenne d'émission.

Ainsi que le fait remarquer M. Blondel, cette concentration doit d'ailleurs être plus grande encore que ne l'indique la théorie exposée ci-dessus, car on a supposé l'antenne de transmission placée dans un milieu isolant s'étendant indéfiniment dans toutes les directions. Or on sait qu'à une hauteur relativement faible, les couches supérieures de l'atmosphère deviennent de plus en plus conductrices, de sorte que, dans la réalité, on se rapproche d'une propagation s'effectuant dans l'intervalle compris entre deux surfaces conductrices parallèles, au moyen d'ondes cylindriques.

On peut traiter ce cas limite en partant des équations de Maxwell.

Considérons un point situé sur le sol, à une distance ρ du pied de l'antenne, et prenons celle-ci comme axe des z. Soit φ l'angle que forme la direction ρ avec la ligne qui joint les pieds des deux antennes que nous prendrons comme axe des x. Les coordonnées du point considéré sont :

$$x = \rho \cos \varphi \qquad y = \rho \sin \varphi \qquad z = 0.$$

Appliquons à ce point les équations de Maxwell (9) et (10) en admettant que l'air est un isolant parfait, c'est-à-dire que $C = 0$.

On a alors :

$$X = 0, \ Y = 0, \ N = 0,$$

et les équations se réduisent à :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dZ}{dy} \qquad \frac{dM}{dt} = -\frac{dZ}{dx} \tag{33}$$

$$\frac{1}{u^2}\frac{dZ}{dt} = \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx}. \tag{34}$$

La variable x étant une fonction de ρ et de φ, on a :

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{dZ}{d\rho}\cdot\frac{d\rho}{dx} + \frac{dZ}{d\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dx}.$$

Comme la composante Z ne dépend que de la distance ρ, la dérivée $\frac{dZ}{d\varphi}$ est nulle. D'autre part, en différentiant la valeur de ρ^2 par rapport à x, on obtient :

$$\frac{d\rho}{dx} = \cos \varphi.$$

On a par suite :

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{dZ}{d\rho}\cos \varphi.$$

On déterminerait de même la valeur de $\frac{dZ}{dy}$, de sorte que les équations (33) peuvent s'écrire :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dZ}{d\rho}\sin \varphi \qquad \frac{dM}{dt} = -\frac{dZ}{d\rho}\cos \varphi. \tag{35}$$

D'autre part, si h et h' représentent les forces électrique et magnétique au point considéré, on a :

$$Z = h \qquad L = h' \sin \varphi \qquad M = - h' \cos \varphi,$$

de sorte que les équations (35) se réduisent à :

$$\frac{dh'}{dt} = \frac{dh}{d\rho}. \tag{36}$$

Quant à l'équation (34), on peut l'écrire :

$$\frac{1}{u^2}\frac{dh}{dt} = \frac{dL}{d\rho}\cdot\frac{d\rho}{dy} + \frac{dL}{d\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dy} - \frac{dM}{d\rho}\cdot\frac{d\rho}{dx} - \frac{dM}{d\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dx}.$$

Nous avons vu plus haut que de la valeur de ρ^2 on déduit :

$$\frac{d\rho}{dx} = \cos \varphi \qquad \frac{d\rho}{dy} = \sin \varphi.$$

De même, en différentiant les valeurs de x et de y, on a :

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{\sin \varphi}{\rho} \qquad \frac{d\varphi}{dy} = \frac{\cos \varphi}{\rho}.$$

Enfin, les valeurs de L et de M donnent :

$$\frac{dL}{d\varphi} = h' \cos \varphi \qquad \frac{dM}{d\varphi} = h' \sin \varphi.$$

On obtient alors, toutes réductions faites :

$$\frac{1}{u^2}\frac{dh}{dt} = \frac{dL}{d\rho}\sin \varphi - \frac{dM}{d\rho}\cos \varphi + \frac{h'}{\rho}.$$

Différentions par rapport à t, on a :

$$\frac{1}{u^2}\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{d^2L}{d\rho\, dt}\sin \varphi - \frac{d^2M}{d\rho\, dt}\cos \varphi + \frac{1}{\rho}\frac{dh'}{dt},$$

ou, en tenant compte de (36) :

$$\frac{1}{u^2}\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{d^2h}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{dh}{d\rho}.$$

Si l'on admet que h est une fonction périodique de fréquence m, on a :

$$\frac{d^2h}{dt^2} = -m^2h = -u^2q^2h;$$

donc enfin :

$$\frac{d^2h}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{dh}{d\rho} + q^2h = 0. \qquad (37)$$

C'est une équation de Bessel, dont l'intégrale peut être développée en série suivant les puissances paires de ρ. Mais, pour les grandes distances, on peut se contenter d'une solution approchée.

Posons :

$$h_1 = \frac{A \cos(\omega t - q\rho)}{\sqrt{\rho}},$$

et remplaçons h par h_1 dans l'équation (37). Le premier membre se réduit alors à :

$$\frac{A \cos(\omega t - q\rho)}{4\rho^2\sqrt{\rho}}.$$

Si l'on admet que ρ est assez grand pour que cette expression soit négligeable, h_1 pourra être considérée comme une solution de (37) et l'on aura :

$$h = \frac{A \cos(\omega t - q\rho)}{\sqrt{\rho}},$$

c'est-à-dire que, dans ce cas, l'amplitude de l'énergie rayonnée varie en raison inverse de la distance.

Il est à présumer que ni ce cas théorique, ni celui qui a été examiné par M. Blondel ne correspondent à la réalité et que la vérité se trouve entre les deux. On peut donc prévoir que la loi de décroissance de l'énergie rayonnée par l'antenne de transmission sera d'abord celle du carré de la distance et se rapprochera de plus en plus de la première puissance à mesure que la distance augmente.

On se trouve donc en présence d'une loi assez complexe ; d'autant plus qu'en outre, cette loi n'est pas la même suivant qu'on opère le jour ou la nuit. Pendant la nuit, la portée augmente, surtout pour les grandes longueurs d'onde.

Parmi les expériences de vérification, il faut citer celles de M. Duddell qui, au moyen de son thermogalvanomètre, mesurait l'intensité à la base de l'antenne de réception. Il reconnut ainsi que le produit de cette intensité par la distance des deux stations est sensiblement constant, ce qui vérifie la loi du carré de la distance pour l'énergie.

On peut citer également les expériences du même genre faites par M. Tissot avec le bolomètre.

Pour ces mesures, il faut avoir soin de choisir des antennes bien dégagées. Des obstacles trop rapprochés, en absorbant ou en réfléchissant les ondes, auraient pour effet de fausser les résultats.

On a reconnu également que l'intensité du courant, dans l'antenne réceptrice, est à peu près proportionnelle, d'une part à la hauteur de l'antenne de transmission, d'autre part à l'intensité du courant dans cette dernière. On trouve une loi analogue si, toutes choses égales d'ailleurs, on fait varier la hauteur de l'antenne réceptrice.

D'une manière générale, on a reconnu que les communications pouvaient être établies à des distances d'autant plus considérables que la hauteur des antennes était plus grande. Dès le début de la télégraphie sans fil, MM. Marconi et Gavey ont établi la relation empirique suivante :

$$a = \alpha \sqrt{D}$$

dans laquelle a est la hauteur en mètres des deux antennes de transmission et de réception supposées égales, D la portée en mètres, c'est-à-dire la distance à laquelle la communication est possible, et α un coefficient numérique. Avec les premiers appareils de M. Marconi et pour des stations séparées par la mer, α était égal à 0,15.

Rôle de la terre. — Le rôle de la terre en télégraphie sans fil doit être considéré à deux points de vue différents. Le premier est la production d'ondes stationnaires dans les antennes, à la transmission et à la réception. La terre sert alors à maintenir un nœud de tension avec un ventre d'intensité à l'une des extrémités de l'antenne, dont il augmente en même temps la capacité.

Toutefois, dans certains cas, par exemple lorsque le sol est mauvais conducteur, on peut éviter de mettre l'antenne à la terre et celle-ci peut être remplacée par un ensemble de conducteurs dont les dimensions électriques (self-induction et capacité) sont équivalentes à celles de l'antenne elle-même. C'est l'application de la théorie de M. Blondel, car cela revient à compléter l'oscillateur de Hertz par un conducteur équivalent à l'antenne, au lieu de confier ce soin à la terre.

Ce conducteur supplémentaire est désigné sous le nom de *contrepoids*. Il est habituellement disposé près du sol, parallèlement à sa surface, dont il est isolé. Sa forme et sa constitution peuvent d'ailleurs être quelconques et il suffit que ses dimensions électriques soient telles que, quand l'antenne est mise en vibration, il se produise un nœud de tension, avec un ventre d'intensité, au point de jonction de l'antenne et du contrepoids.

Le deuxième point de vue auquel il faut envisager le rôle de la terre est l'effet produit sur la propagation des ondes par sa présence entre les deux stations. Nous avons vu plus haut que, d'après la théorie de M. Blondel, l'énergie se trouve condensée à la surface du sol. Si celui-ci était un conducteur parfait présentant une surface unie, les ondes se réfléchiraient sans déperdition et l'effet produit à distance par l'antenne reliée au sol serait le même que si l'on avait, dans l'espace seul, l'oscillateur complet formé par l'antenne et son image.

Dans la réalité, il n'en est pas de même. D'abord, le sol présente des aspérités qui gênent la propagation et dis-

persent l'énergie dans des directions quelconques. Mais de plus, en raison de sa conductibilité imparfaite, le sol absorbe une partie de cette énergie. On connaît les calculs par lesquels lord Kelvin a montré que les courants alternatifs pénètrent dans les conducteurs à une profondeur qui dépend de la nature du conducteur considéré et de la fréquence du courant. En s'appuyant sur cette théorie, M. Brylinski a montré que, pour une terre humide, les oscillations hertziennes pénètrent à une profondeur qui est de l'ordre de 15 à 20 m, tandis que, pour l'eau salée, cette profondeur n'est plus que de 2 à 3 m.

La conséquence est que la portée en télégraphie sans fil doit être plus grande sur mer que sur terre, la mer présentant le double avantage d'être plus conductrice et d'offrir moins d'aspérités à sa surface. C'est en effet ce que confirme l'expérience.

CHAPITRE VI

EMPLOI DES ANTENNES POUR LA TRANSMISSION ET LA RÉCEPTION

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, l'antenne d'une station de télégraphie sans fil sert, pendant la transmission, à produire le rayonnement d'énergie dans toutes les directions et, pendant la réception, à collecter une partie de l'énergie rayonnée par la station correspondante.

Nous indiquerons d'abord les dispositions à adopter pour l'installation de l'antenne proprement dite ; nous décrirons ensuite les appareils qu'il convient de lui adjoindre afin de l'utiliser comme organe de transmission ou comme organe de réception.

Formes d'antennes. — L'avantage de disposer l'antenne verticalement, ou plutôt dans une situation telle que ses deux extrémités soient à des distances différentes du sol, a été reconnu très nettement par tous les expérimentateurs. Des essais ont été faits au moyen d'antennes horizontales, mais les communications n'ont pu être établies qu'à de plus courtes distances. Suivant les explications données par M. Righi, ce fait doit être attribué à l'interférence des ondes émises directement par l'antenne et de celles réfléchies par le sol. On a alors proposé de placer l'antenne horizontale à une distance du sol égale au quart de la longueur d'onde. Mais on n'aurait que peu d'avantage à adopter cette disposition, les longueurs d'ondes employées en télégraphie sans fil étant de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Cependant, aucun essai

n'a jamais été fait, à notre connaissance. D'ailleurs, les nombreux obstacles que rencontrent les ondes émises à faible distance du sol gêneraient considérablement leur propagation, si on choisissait une faible longueur d'onde, c'est-à-dire si l'on se plaçait à petite distance du sol.

En ce qui concerne le degré d'inclinaison de l'antenne sur la verticale, on a constaté que cette inclinaison pouvait être supérieure à 50° ou 60°, sans qu'il en résulte une différence notable dans les communications. L'inclinaison des antennes l'une par rapport à l'autre n'a également qu'une importance secondaire.

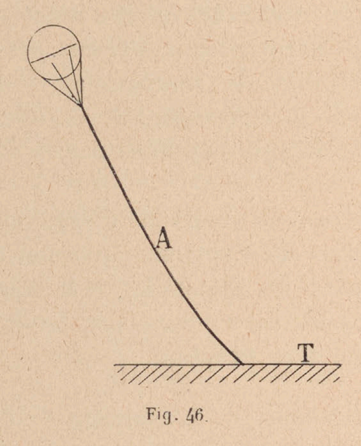


Fig. 46.

En ce qui concerne l'influence du diamètre des antennes, nous avons constaté qu'elle est très faible. Toutefois, avec des tuyaux de 1 m ou 1,50 m de diamètre, elle devient considérable. Avec des tuyaux ayant ces dimensions et une hauteur de 8 m environ, M. Marconi a pu communiquer à 50 km, alors qu'avec des antennes filiformes, la hauteur nécessaire était de 25 à 30 m.

Nous avons vu que la portée augmente avec la hauteur de l'antenne. On accroît également la portée en lui donnant une plus grande surface de rayonnement, ce que l'on obtient en formant l'antenne de plusieurs fils.

Ce seront les conditions locales qui fixeront la part qu'il sera possible d'attribuer à ces deux éléments, hauteur et surface. Nous décrirons ci-après les formes d'antennes les plus usitées dans la pratique.

L'antenne *filiforme* (fig. 46) est formée d'un fil unique nu ou recouvert d'un isolant. En général, le fil isolé est préférable, car l'isolant augmente sa capacité. D'après Slaby, cette augmentation peut, dans certains cas, aller jusqu'à 20 p. 100.

Ordinairement, on n'emploie l'antenne filiforme que

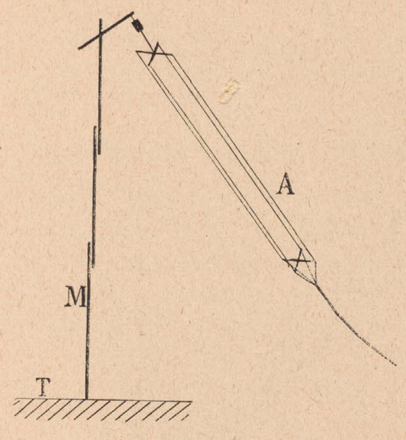


Fig. 47.

quand il est possible de lui donner une grande hauteur, par exemple en la soutenant au moyen d'un ballon ou d'un cerf-volant.

L'antenne *prismatique* (fig. 47) est formée de fils parallèles disposés suivant les génératrices d'un cylindre. Le nombre des fils est au moins de quatre; leur écartement est généralement fonction de la hauteur; cependant, il ne dépasse guère 1 ou 2 m. Cette forme est employée lorsqu'on dispose d'un support suffisamment élevé, tel qu'un mât de navire.

L'antenne *en nappe* (fig. 48) comprend un nombre

plus ou moins grand de fils disposés dans le même plan et se réunissant à la partie inférieure. A la partie supé-

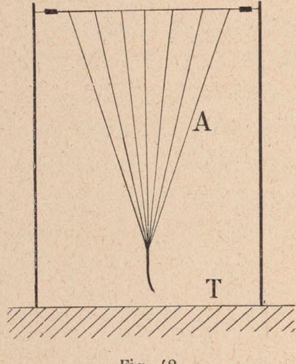


Fig. 48.

rieure, les fils sont réunis par un conducteur horizontal.

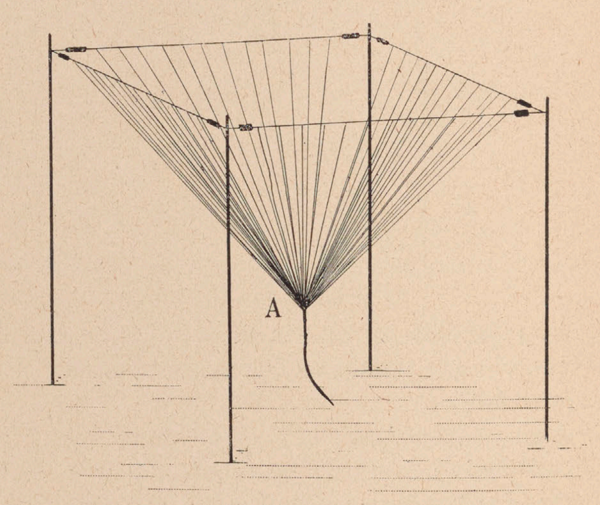


Fig. 49.

Cette forme d'antenne est employée avec deux supports de hauteur moyenne.

L'antenne *en pyramide renversée* (fig. 49) a été indiquée par M. Marconi pour les stations puissantes.

Les formes principales que l'on vient de décrire peuvent être modifiées, suivant l'espace dont on dispose et la longueur d'onde à réaliser.

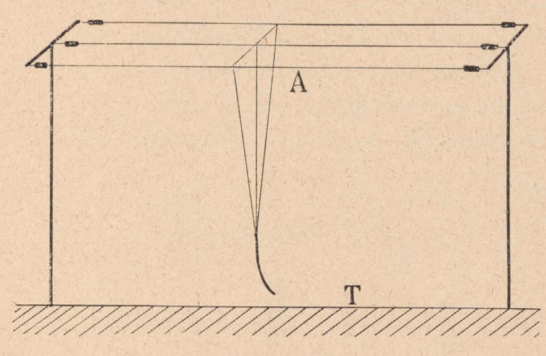


Fig. 50.

Nous citerons, en particulier, l'antenne *en* T (fig. 50), très avantageuse pour les navires à deux mâts, car elle donne une grande surface de rayonnement pour une lon-

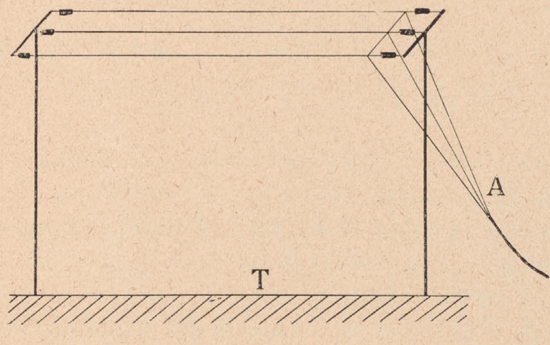


Fig. 51.

gueur d'onde relativement faible. Le nombre des conducteurs peut être plus ou moins grand ; ils sont disposés soit dans un même plan, soit suivant les arêtes d'un prisme.

L'antenne *coudée* (fig. 51) est employée quand on veut réaliser une grande longueur d'onde avec deux supports seulement. L'extrémité inférieure de l'antenne peut être amenée soit en dehors des deux supports, soit entre eux lorsque la place fait défaut. L'un des supports peut être supprimé, l'extrémité supérieure de l'antenne étant alors fixée au sol par un câble isolé ou reliée à un support de faible hauteur. En tous cas, il faut que l'extrémité de l'antenne reste à une distance du sol égale au moins au tiers de la hauteur totale.

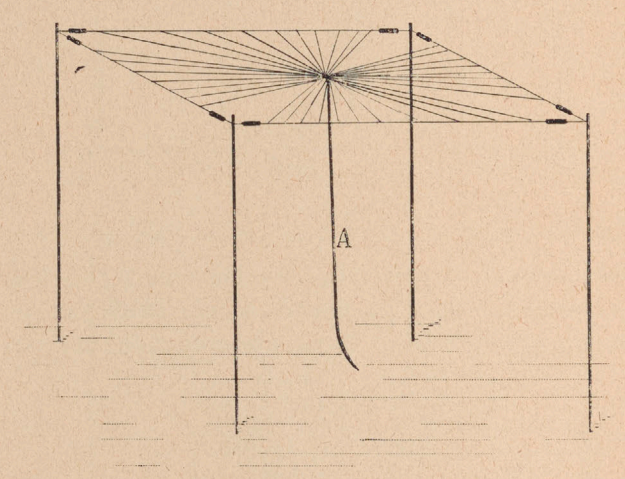


Fig. 52.

L'antenne *en plan horizontal* (fig. 52), indiquée par M. Blondel, permet d'employer des supports de faible hauteur. Les conducteurs sont disposés dans le plan horizontal formé par les sommets des supports, de manière à converger vers un point central où ils sont réunis à un conducteur vertical.

Enfin, l'antenne *en parapluie* (fig. 53), qui ne nécessite qu'un seul support, se déduit de la précédente en surélevant le centre et en reliant au sol les extrémités des conducteurs. Ici encore, ceux-ci doivent s'arrêter à une

distance du sol au moins égale au tiers de la hauteur totale. Le support peut d'ailleurs faire lui-même partie de l'antenne, à la condition d'être soigneusement isolé du sol.

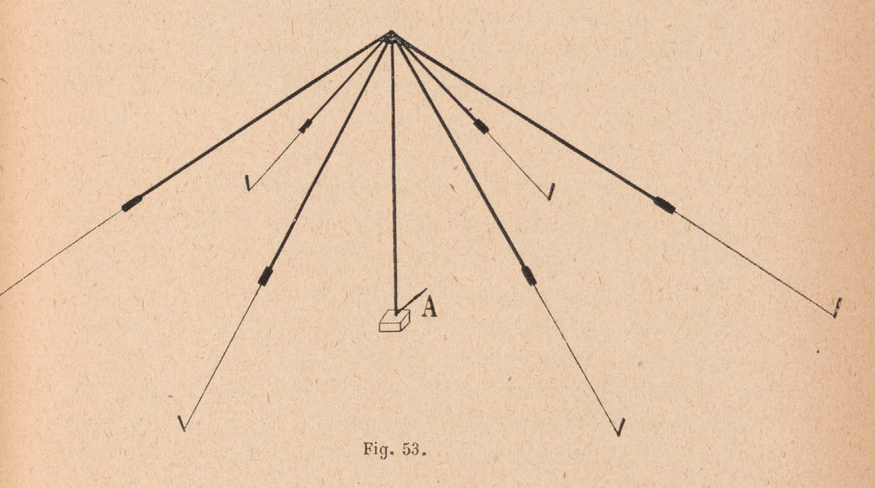


Fig. 53.

Les formes indiquées par les figures 54 et 55 peuvent être employées également avec des supports de faible

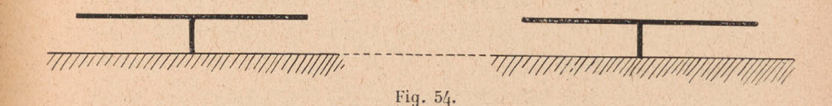


Fig. 54.

hauteur. La dernière a été indiquée par Garcia en 1902 et la première par nous-mêmes à la même époque. Avec

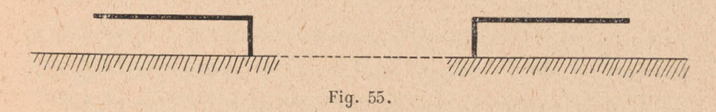


Fig. 55.

ces dispositions, il y a un intérêt notable à placer les antennes des deux stations correspondantes de manière qu'elles soient dans le plan vertical qui contient les deux stations.

Quelle que soit la forme adoptée pour l'antenne, elle doit être complétée par une mise à la terre, faite avec le plus grand soin, au moyen de plaques métalliques de grande surface. Toutefois, cette mise à la terre peut être remplacée par un contrepoids, constitué soit avec des plaques ou des grillages métalliques, soit avec des fils rayonnants.

Excitation de l'antenne pour la transmission. — Lorsque l'antenne est excitée par l'un des procédés que nous décrivons ci-après, elle vibre normalement en quart d'onde. Pour une antenne filiforme, la longueur d'onde peut être représentée d'une façon suffisamment exacte par quatre fois la longueur de l'antenne.

Il n'en est plus de même avec les antennes composées, c'est-à-dire formées de plusieurs fils, dont la longueur n'est plus le seul élément à considérer. En effet, si, sans changer leur longueur, on fait varier le nombre des fils et leur écartement, on modifie en même temps la capacité et la self-induction, dont dépend la longueur d'onde. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à la mesure directe pour obtenir la longueur d'onde propre de l'antenne considérée.

Pour produire les oscillations de l'antenne, on peut employer deux procédés, l'*excitation directe* ou l'*excitation indirecte*. Cette dernière peut d'ailleurs être elle-même réalisée de deux façons, par *induction* ou par *dérivation*.

Dans la description de ces divers procédés, nous ferons abstraction de la source d'énergie à haute tension, qui sera par exemple une bobine d'induction ordinaire.

Excitation directe. — C'est le procédé le plus simple, qui a été le premier employé par M. Marconi. Il consiste à constituer le condensateur, dont la décharge donne lieu à la production d'oscillations électriques, par l'antenne

elle-même. L'antenne A (fig. 56) est alors reliée à l'une des électrodes d'un éclateur C dont l'autre électrode est reliée à la terre. On forme ainsi un condensateur dont les armatures sont l'antenne d'une part et le sol d'autre part. Ce condensateur est chargé par une source à haute tension B dont les pôles sont reliés à ses armatures. Les

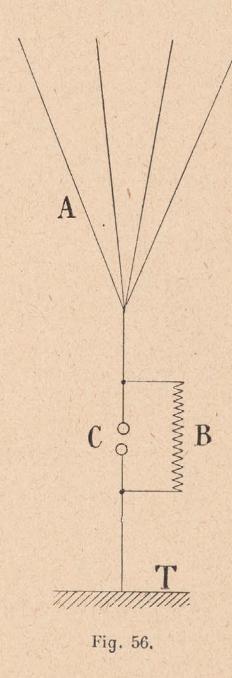


Fig. 56.

étincelles de décharge qui jaillissent entre les électrodes de l'éclateur donnent naissance à des oscillations dans l'antenne.

Ce procédé a l'avantage de la simplicité, mais il ne permet l'emploi que d'une quantité limitée d'énergie. En effet, l'énergie mise en jeu est représentée par le produit $\frac{1}{2}KV^2$, K étant la capacité du condensateur et V la tension de décharge. Or, la capacité K qui est détermi-

née par les dimensions de l'antenne est toujours relativement faible ; on ne peut donc augmenter l'énergie qu'en augmentant le facteur V, c'est-à-dire en ayant recours à des sources à très haute tension. On est assez vite arrêté dans cette voie par la double difficulté d'emploi et de construction de pareilles sources.

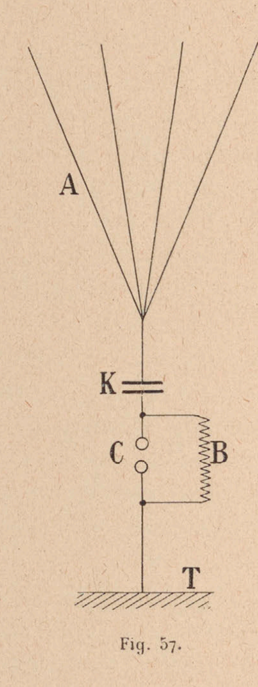


Fig. 57.

De plus, l'augmentation de longueur de l'étincelle qui résulte de l'accroissement de la tension entraîne l'augmentation de la résistance ohmique et par suite celle de l'amortissement des oscillations produites.

Aussi l'excitation directe n'est-elle employée que dans les cas où il suffit de mettre en jeu une faible quantité d'énergie.

En général, l'antenne vibre avec sa période propre. On peut cependant obtenir également des harmoniques et en

particulier l'harmonique 3, lorsque l'antenne est régulière, c'est-à-dire lorsque sa forme est telle que la capacité et la self-induction soient uniformément réparties sur sa longueur.

Si l'on veut produire des ondes de période plus courte sans changer la longueur de l'antenne, il faut intercaler sur celle-ci un condensateur K (fig. 57), qui peut être

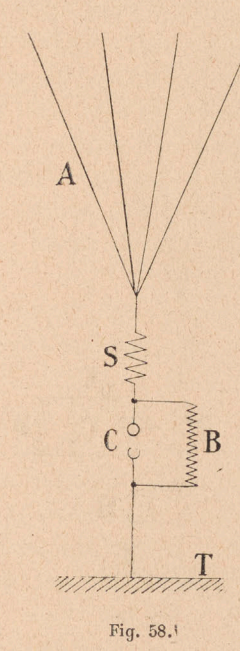


Fig. 58.

placé avant ou après l'éclateur. On diminue ainsi la capacité de l'ensemble et par suite la longueur d'onde.

Dans le cas où l'on veut, au contraire, augmenter la période, il suffit d'intercaler un certain nombre de spires (fig. 58), de manière à augmenter la self-induction totale.

Toutefois, ces corrections ne peuvent se réaliser qu'au détriment du rendement, et il y a toujours une meilleure

utilisation de l'énergie lorsque l'antenne ne contient ni capacité ni self additionnelles.

Excitation indirecte par induction. — Dans ce mode d'excitation, on produit les oscillations dans un circuit voisin de l'antenne, comme l'indique la figure 59. Sur l'antenne A, on intercale le secondaire S d'un transfor-

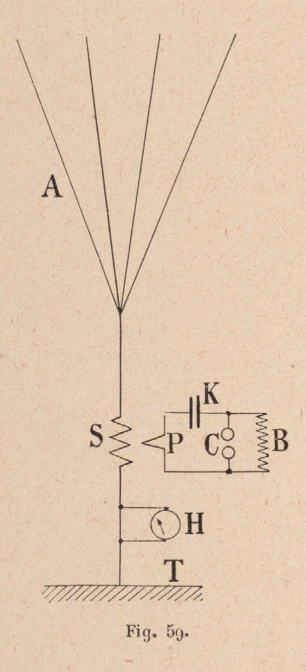


Fig. 59.

mateur Tesla et on constitue le circuit oscillant au moyen du primaire P de ce transformateur, d'un condensateur K et d'un éclateur C. La source à haute tension B est montée indifféremment aux bornes de l'éclateur ou aux bornes du condensateur. Le transformateur Tesla est simplement constitué par deux circuits comprenant un nombre très limité de spires de forme circulaire ou carrée.

Pour obtenir le rendement maximum, il faut que la période des oscillations engendrées dans le circuit

fermé CKP soit la même que la période propre de l'antenne, en comprenant dans celle-ci le secondaire S.

On arrive pratiquement à ce résultat en plaçant, comme nous l'avons indiqué, un ampèremètre thermique H en dérivation au pied de l'antenne. On note alors ses indications en faisant varier un des éléments électriques de l'un des deux circuits ; la résonance est établie lorsque l'ampèremètre indique le maximum d'intensité. Il est préférable, pour opérer ce réglage, d'agir sur la capacité ou sur la self du circuit fermé CKP, car il y a avantage, comme dans le cas de l'excitation directe, à ce que le circuit de l'antenne ne contienne ni capacité ni self additionnelles. Pour la même raison, il y a intérêt à réduire au minimum le nombre des spires du secondaire S ; on ne dépasse pas quatre ou cinq en général.

On peut aussi employer l'ondamètre pour réaliser l'accord, en mesurant séparément les longueurs d'onde des deux circuits.

Accouplement. — Lorsqu'on mesure la période des oscillations dans l'ensemble des deux circuits dont l'accord a été réalisé, on constate l'existence de deux mouvements vibratoires superposés ayant chacun une période différente de celle de l'antenne ou du circuit excitateur pris isolément.

On peut se rendre compte de ce fait en étendant au cas de deux circuits la formule de Thomson, établie page 26 pour le cas d'un circuit unique.

Considérons deux circuits voisins. Soient $R_1 R_2$ leurs résistances, $L_1 L_2$ leurs coefficients de self-induction, $C_1 C_2$ leurs capacités. La self et la capacité étant supposées concentrées en un seul point, les capacités sont représentées par des condensateurs ayant des charges Q_1 et Q_2 à l'instant t. Soit enfin M le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits. A l'instant t on a dans chacun

d'eux des courants d'intensités i_1 et i_2 dus aux forces électromotrices $\frac{Q_1}{C_1}$, $\frac{Q_2}{C_2}$. On aura donc les deux équations :

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 = \frac{Q_1}{C_1},$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 = \frac{Q_2}{C_2}.$$

D'autre part on a :

$$i_1 = -\frac{dQ_1}{dt} \qquad \frac{di_1}{dt} = -\frac{d^2Q_1}{dt^2},$$

$$i_2 = -\frac{dQ_2}{dt} \qquad \frac{di_2}{dt} = -\frac{d^2Q_2}{dt^2},$$

d'où :

$$L_1 \frac{d^2Q_1}{dt^2} + M \frac{d^2Q_2}{dt^2} + R_1 \frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_1}{C_1} = 0,$$

$$L_2 \frac{d^2Q_2}{dt^2} + M \frac{d^2Q_1}{dt^2} + R_2 \frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_2}{C_2} = 0.$$

Or, on sait que pour les hautes fréquences et en particulier pour les oscillations électriques, on peut négliger la résistance ohmique. On peut donc écrire :

$$L_1 \frac{d^2Q_1}{dt^2} + M \frac{d^2Q_2}{dt^2} + \frac{Q_1}{C_1} = 0, \qquad (38)$$

$$L_2 \frac{d^2Q_2}{dt^2} + M \frac{d^2Q_1}{dt^2} + \frac{Q_2}{C_2} = 0. \qquad (39)$$

Différentiant deux fois ces équations, il vient :

$$L_1 \frac{d^4Q_1}{dt^4} + M \frac{d^4Q_2}{dt^4} + \frac{1}{C_1} \frac{d^2Q_1}{dt^2} = 0, \qquad (40)$$

$$L_2 \frac{d^4Q_2}{dt^4} + M \frac{d^4Q_1}{dt^4} + \frac{1}{C_2} \frac{d^2Q_2}{dt^2} = 0. \qquad (41)$$

Éliminant $\frac{d^4Q_2}{dt^4}$ et $\frac{d^2Q_2}{dt^2}$ entre (38), (40) et (41), on a :

$$\left(1 - \frac{M^2}{L_1L_2}\right) \frac{d^4Q_1}{dt^4} + \left(\frac{1}{L_1C_1} + \frac{1}{L_2C_2}\right) \frac{d^2Q_2}{dt^2} + \frac{1}{C_1L_1C_2L_2} = 0,$$

ou en désignant par $m_1\, m_2$ les fréquences $\frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ et $\frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ dans les deux circuits et posant $\frac{M^2}{L_1 L_2} = x^2$:

$$(1 - x^2) \frac{d^4 Q_1}{dt^4} + (m_1^2 + m_2^2) \frac{d^2 Q_1}{dt^2} + m_1^2 m_2^2 Q_1 = 0. \quad (42)$$

Cette relation ne changeant pas quand on remplace L_1 et C_1 respectivement par L_2 et C_2, on aura la même équation en Q_2.

L'équation (42) est une équation linéaire du quatrième ordre, à coefficients constants, dont l'intégrale générale est :

$$Q_1 = A_1 e^{\rho' t} + A_2 e^{-\rho' t} + A_3 e^{\rho'' t} + A_4 e^{-\rho'' t},$$

en désignant par $\pm\, \rho'$ et $\pm\, \rho''$ les racines de l'équation bicarrée :

$$(1 - x^2)\, \rho^4 + (m_1^2 + m_2^2)\, \rho^2 + m_1^2 m_2^2 = 0. \quad (43)$$

Cette équation donne :

$$\rho^2 = \frac{1}{2(1 - x^2)} \left[-(m_1^2 + m_2^2) \pm \sqrt{(m_1^2 + m_2^2)^2 - 4\, m_1^2 m_2^2 (1 - x^2)} \right].$$

Les deux valeurs de ρ_2 étant réelles et négatives, les quatre valeurs de ρ sont imaginaires.

Posons :

$$\rho' = m' \sqrt{-1}, \qquad \rho'' = m'' \sqrt{-1}.$$

On aura :

$$Q_1 = A_1 e^{m' \sqrt{-1}} + A_2 e^{-m' \sqrt{-1}} + A_3 e^{m'' \sqrt{-1}} + A_4 e^{-m'' \sqrt{-1}},$$

ou en appliquant la formule d'Euler :

$$Q_1 = A_1 (\cos m't + \sqrt{-1} \sin m't) + A_2 (\cos m't - \sqrt{-1} \sin m't)$$
$$+ A_3 (\cos m''t + \sqrt{-1} \sin m''t) + A_4 (\cos m''t - \sqrt{-1} \sin m''t).$$

La valeur de Q_1 ne pouvant être imaginaire, les termes en $\sqrt{-1}$ doivent s'annuler et il reste :

$$Q_1 = (A_1 + A_2) \cos m't + (A_3 + A_4) \cos m''t. \quad (44)$$

Les valeurs de $A_1 + A_2$ et $A_3 + A_4$ seront déterminées par les conditions initiales. Si l'on admet que Q_1 se rapporte au circuit primaire, pour $t = 0$ la charge Q_1 est égale à une certaine charge initiale Q_0, d'où :

$$Q_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 ;$$

or pour $t = 0$ on a aussi $i_1 = 0$ et

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{d^2Q_1}{dt^2} = 0,$$

d'où :

$$m'^2 (A_1 + A_2) + m''^2 (A_3 + A_4) = 0.$$

On en déduit :

$$\rho'^2 (A_1 + A_2) + \rho''^2 (A_3 + A_4) = 0.$$

On a ainsi deux équations qui permettent de déterminer $A_1 + A_2$ et $A_3 + A_4$, d'où :

$$A_1 + A_2 = -\frac{Q_0\rho''^2}{\rho'^2 - \rho''^2}, \qquad A_3 + A_4 = \frac{Q_0\rho'^2}{\rho'^2 - \rho''^2}.$$

L'équation (44) montre l'existence, dans le circuit primaire, de deux oscillations de périodes m' et m''. Il en sera de même dans le secondaire. A la vérité, pour $t = 0$ on a $Q_2 = 0$; mais on sait que, dans ce cas, la théorie de l'induction admet, dans le secondaire, l'existence d'une charge initiale qui, si faible qu'elle soit, est suffisante pour amorcer le phénomène.

Les deux oscillations de périodes différentes subsistent encore lorsque les deux circuits sont accordés, c'est-à-dire si $m_1 = m_2$. On a alors, en désignant par m la valeur commune :

$$\rho^2 = \frac{m^2}{1 - x^2}(-1 \pm x),$$

d'où :

$$m'^2 = -\rho'^2 = \frac{m^2}{1-x}, \qquad m' = \frac{m}{\sqrt{1-x}},$$

$$m''^2 = -\rho''^2 = \frac{m^2}{1+x}, \qquad m'' = \frac{m}{\sqrt{1+x}}.$$

Si $\lambda \lambda' \lambda''$ sont les longueurs d'onde correspondant aux fréquences $m m' m''$, on aura :

$$\lambda' = \lambda \sqrt{1-x}, \qquad \lambda'' = \lambda \sqrt{1+x}.$$

Le coefficient $x = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ se nomme le *coefficient d'accouplement* des deux circuits. Lorsque la valeur de x est élevée (voisine de l'unité), l'accouplement est dit *rigide* ou *serré*. Si au contraire la valeur de x est petite, l'accouplement est *faible* ou *lâche*.

Les deux ondes $\lambda' \lambda''$ diffèrent d'autant plus que l'accouplement x est plus fort. Nous verrons plus loin que le circuit de réception ne peut être accordé que sur l'une ou l'autre de ces ondes. Il y aurait donc avantage, pour obtenir la meilleure utilisation de l'énergie, à produire une onde unique. Mais ce cas est irréalisable, car il correspondrait à une valeur nulle de l'induction mutuelle. D'autre part, on utilise d'autant mieux l'énergie du circuit excitateur que l'induction mutuelle est plus élevée. Il y aura donc une valeur intermédiaire de M qui correspondra à l'accouplement le plus avantageux.

Les deux ondes ainsi engendrées n'ont d'ailleurs pas la même énergie. En général, c'est l'onde la plus longue qui a le plus d'énergie, en même temps qu'un amortissement plus faible. Le rapport des énergies correspondant aux deux ondes dépend des éléments électriques des circuits couplés et en particulier de leurs capacités, mais il n'a pas encore été établi de formule précise à ce sujet. On a reconnu cependant qu'il y avait avantage à augmenter autant que possible la capacité du circuit excitateur.

Lorsque l'antenne a un faible amortissement propre, comme cela a lieu pour les antennes à grande surface, on peut obtenir une bonne utilisation de l'énergie du circuit excitateur, tout en employant un accouplement lâche, à la condition toutefois que le circuit excitateur ait lui-même un faible amortissement. Dans ce cas, en effet, l'énergie est communiquée peu à peu à l'antenne;

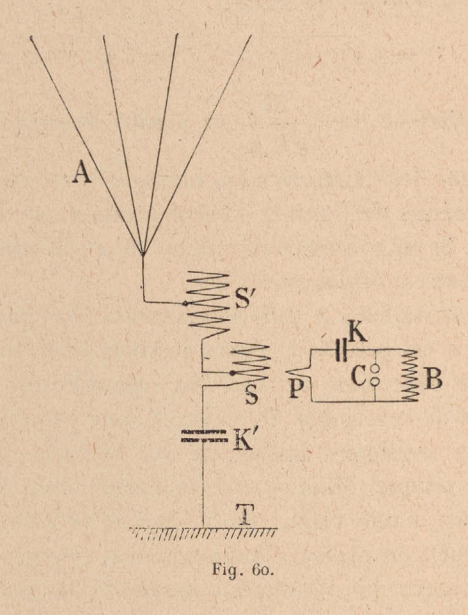


Fig. 60.

l'effet de chaque oscillation s'ajoute à ce qui reste de l'effet produit par les oscillations précédentes de la même décharge, et ce reste a encore une valeur appréciable, puisqu'on suppose l'amortissement faible dans l'antenne.

Drude a trouvé que si γ_1 et γ_2 sont les décréments logarithmiques des deux circuits pris isolément, les décréments $\gamma' \gamma''$ des deux ondes d'accouplement sont donnés par les formules :

$$\gamma' = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2\sqrt{1 - x}}, \qquad \gamma'' = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2\sqrt{1 + x}}.$$

Ces valeurs montrent que, si l'accouplement est rigide, c'est-à-dire x voisin de l'unité, on peut faire en sorte que l'une des ondes radiées par l'antenne ait un amortissement beaucoup plus faible que dans le cas d'une antenne simple seule. C'est là un des avantages de l'excitation indirecte.

Afin de pouvoir faire varier à volonté l'accouplement du circuit excitateur et de l'antenne, on intercale sur celle-ci (fig. 60), outre le secondaire réglable du Tesla, une self S′ et un condensateur K′ tous deux réglables.

L'étude complète des phénomènes d'accouplement n'a pas encore été faite, bien que d'importants travaux aient déjà été publiés à ce sujet par Wien, Abraham, Slaby, Seibt, etc.

Excitation indirecte par dérivation. — Au lieu de séparer complètement l'antenne du circuit excitateur, on peut intercaler dans ce dernier une partie de la self de l'antenne, ce qui revient à faire usage d'un résonateur Oudin au lieu d'un transformateur Tesla. Le montage est alors celui qui est indiqué par la figure 61.

Les réglages et les mesures se font comme pour l'excitation par induction ; les formules et les considérations relatives aux accouplements sont également les mêmes.

Ce procédé a sur le précédent l'avantage de la simplicité et il dispense des précautions que nécessite, dans le cas de l'excitation par induction, l'obligation d'isoler l'un de l'autre les deux circuits. Pour pouvoir régler l'accouplement, on emploie, dans ce cas, le montage représenté par la figure 62, qui est analogue à celui indiqué ci-dessus (fig. 60) pour l'excitation par induction.

A la vérité, avec l'excitation par dérivation, il est plus difficile de réaliser des accouplements très lâches, mais cela n'a pas grand inconvénient dans la pratique, puisque ce sont les accouplements moyens qui sont les plus avan-

tageux. Aussi donne-t-on le plus souvent la préférence à l'excitation par dérivation.

Quel que soit le procédé adopté, l'excitation indirecte permet de mettre en jeu une plus grande quantité d'énergie, sans qu'il soit nécessaire, pour cela, d'employer des sources d'électricité à trop haute tension. Cette énergie est en effet fonction de la capacité du circuit excitateur,

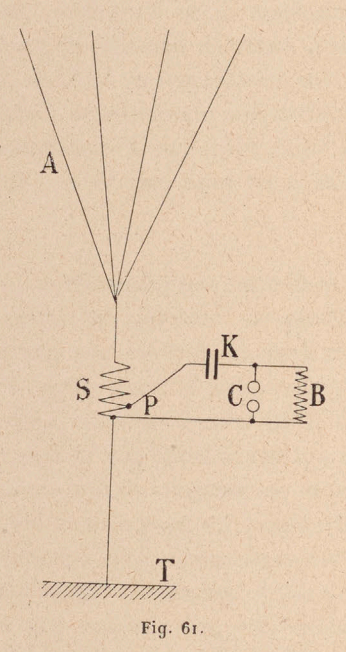


Fig. 61.

qui est beaucoup plus considérable dans le cas de l'excitation indirecte. Mais il faut remarquer qu'en augmentant la capacité, on augmente la longueur d'onde, de sorte que la mise en jeu d'une grande quantité d'énergie exige en même temps l'emploi de grandes longueurs d'onde.

Il est donc en général assez difficile de produire de courtes longueurs d'onde avec de grandes énergies. On peut cependant augmenter un peu l'énergie en ayant

recours à une double transformation, comme l'a indiqué M. Marconi (fig. 63). La bobine B charge un condensateur K', aussi grand que possible, lequel en se déchargeant produit des oscillations de période quelconque dans le circuit C'K'P'. Ces oscillations en induisent d'autres dans le secondaire S' d'un transformateur de Tesla et ces nouvelles oscillations chargent le condensateur K

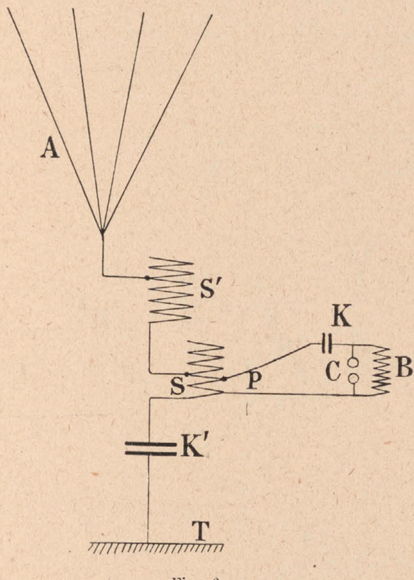


Fig. 62.

qui, en se déchargeant dans le circuit CKP, agit à son tour sur l'antenne. On peut ainsi charger le condensateur K à une tension très élevée et par suite augmenter l'énergie mise en jeu, tout en n'employant à l'origine qu'une source B à tension beaucoup plus faible ; c'est alors le circuit CKP qui est accordé sur celui de l'antenne.

Ce montage s'applique également à l'excitation par dérivation. On peut encore monter plusieurs circuits excitateurs en parallèle, charger les condensateurs en parallèle et les décharger en série, etc., etc.

Ces procédés sont d'ailleurs peu employés, les grandes longueurs d'onde étant plus avantageuses à d'autres points de vue, en particulier, comme on l'a vu plus haut, pour franchir de grandes distances.

Pour exciter l'antenne, non plus suivant sa vibration fondamentale, mais suivant un harmonique, l'harmonique 3 par exemple, il faut employer l'excitation indi-

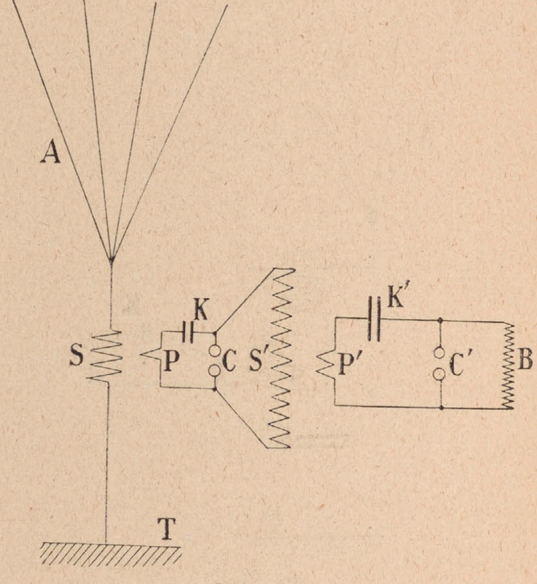


Fig. 63.

recte. Il suffit alors de choisir convenablement le circuit excitateur, et les procédés de réglage sont les mêmes que pour l'onde fondamentale.

Réception. — Sous l'action des ondes produites par la transmission, l'antenne de réception devient le siège d'ondes stationnaires analogues à celles qui existent dans l'antenne de transmission.

Le problème de la réception consiste tout d'abord

à donner à l'antenne réceptrice une période égale à celle des ondes transmises, ou à l'une d'elles seulement, si la transmission est faite par excitation indirecte avec accouplement rigide. Il faut ensuite faire agir, avec le maximum de rendement, les oscillations de l'antenne sur l'appareil chargé de déceler la présence des ondes ou détecteur.

On peut résoudre ce problème par des procédés analogues à ceux que nous avons indiqués pour la transmission, savoir : l'*action directe* et l'*action indirecte* par *induction* ou par *dérivation*.

Action directe. — Le détecteur d'ondes D (on verra plus loin la description des diverses sortes de détecteurs)

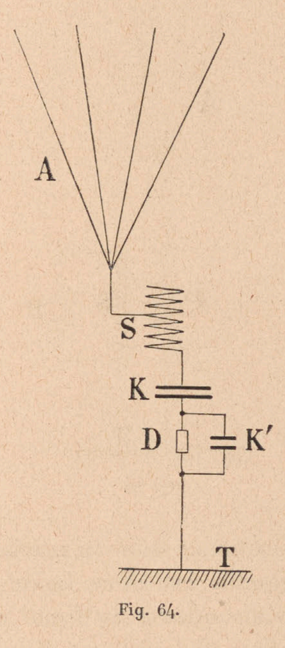


Fig. 64.

est intercalé directement sur l'antenne A (fig. 64), qui contient encore une self S et une capacité K permettant de lui donner, malgré la présence du détecteur, la même

période que les ondes transmises. Toutefois, comme les détecteurs présentent en général, au repos, une résistance considérable, cet accord est assez difficile à réaliser. En outre, la présence du détecteur donne à l'antenne un amortissement propre considérable. On atténue cet inconvénient en plaçant un condensateur K′ aux bornes du détecteur ; néanmoins, ce procédé est peu employé.

Action indirecte par induction. — Dans ce cas, on fait agir les oscillations sur le détecteur par l'intermédiaire

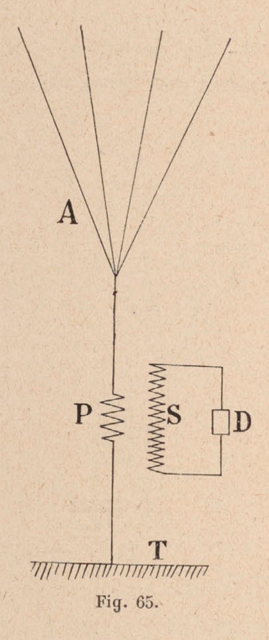


Fig. 65.

d'un petit transformateur dont le primaire est intercalé sur l'antenne, laquelle est alors facile à accorder. Le secondaire du transformateur est fermé sur le détecteur, soit directement (fig. 65), soit par l'intermédiaire d'un condensateur K′ (fig. 66). On ajoute quelquefois un autre condensateur K″ aux bornes du détecteur, pour diminuer l'influence de la résistance de celui-ci.

Le circuit de l'antenne et le circuit qui agit sur le détecteur constituent deux circuits accouplés. Comme on l'a vu pour la transmission, l'ensemble de ces deux circuits est encore le siège de deux ondes distinctes qui diffèrent d'autant plus que l'accouplement est plus serré. Au premier abord, il semble que l'on devrait choisir l'accouplement de la réception de telle sorte que ces deux ondes aient des longueurs respectivement égales à celles des deux ondes de la transmission. Mais on a reconnu que ce double accord est impossible à réaliser,

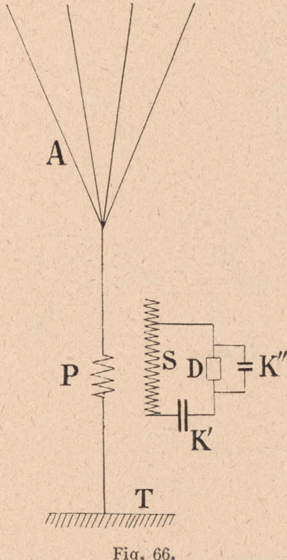


Fig. 66.

en raison des différences considérables que présentent les éléments électriques (résistance, capacité, self-induction) des circuits, à la transmission et à la réception. On est alors obligé de s'accorder sur une seule des ondes de la transmission, l'autre étant sacrifiée.

On agit sur l'accouplement des circuits de réception par les mêmes procédés que pour la transmission. La

figure 67 représente le montage complet. Sur l'antenne sont intercalés, avec la self réglable S′ et le condensateur réglable K, le primaire P du transformateur. Un condensateur K‴ est placé aux bornes de P. En agissant sur ces divers organes, on accorde le circuit de l'antenne sur l'onde transmise. Le circuit de réception proprement dit comprend le secondaire S, un condensateur K′ et le dé-

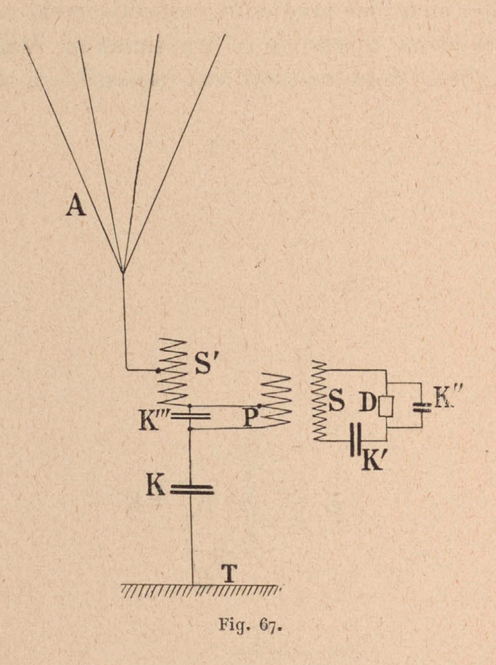


Fig. 67.

tecteur D, aux bornes duquel est placé un condensateur K″. Ce circuit étant également accordé sur l'onde transmise, on donne aux deux circuits l'accouplement que l'on juge convenable. On parfait ensuite les réglages d'accord, pour tenir compte de l'effet de l'accouplement.

En général, tous ces réglages se font par tâtonnement, après que l'on a choisi convenablement le secondaire S, dans le cas où celui-ci n'est pas réglable. Lorsque la longueur de l'onde transmise est connue, il est possible

de régler à l'avance d'une manière précise le circuit de l'antenne. Celle-ci étant coupée en un point voisin du sol, on y intercale un éclateur relié à une bobine d'induction. L'antenne étant alors excitée directement, on peut mesurer sa période à l'aide d'un ondamètre. On agit ensuite sur les organes de réglage jusqu'à ce que la période indiquée par l'ondamètre pour l'antenne soit égale à celle de l'onde transmise.

Au lieu de constituer le secondaire par un seul enrou-

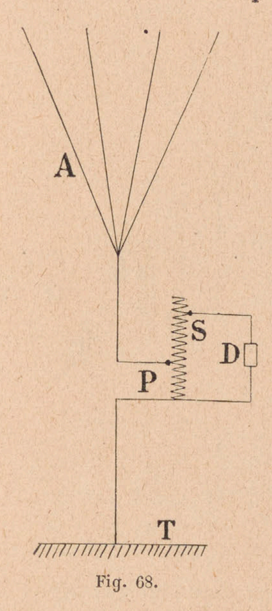


Fig. 68.

lement, on peut le diviser en deux parties entre lesquelles on intercale un condensateur. Enfin, le montage théorique qui vient d'être indiqué peut recevoir quelques légères modifications de détail suivant la nature du détecteur employé. Ces modifications seront indiquées au cours de la description des détecteurs d'ondes.

Action indirecte par dérivation. — Comme pour la transmission, ce procédé se déduit du précédent en pré-

levant, sur le circuit du secondaire du petit transformateur, les spires nécessaires pour constituer le primaire intercalé sur l'antenne, comme l'indique la figure 68.

Le montage théorique est alors celui des figures 68 et 69. La figure 70 donne le montage complet avec accouplement variable.

Les procédés de réglage pour les accords et les accou-

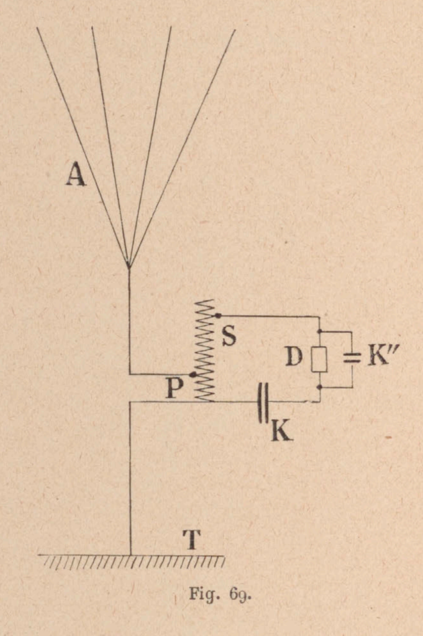


Fig. 69.

plements sont les mêmes que dans le cas de l'action indirecte par induction. Mais, les circuits n'étant pas indépendants l'un de l'autre, ces réglages sont moins faciles, aussi emploie-t-on de préférence l'action indirecte par induction.

Il importe de remarquer que l'on ne peut, dans aucun cas, obtenir des résonances absolues, puisque l'accord complet ne pourrait être réalisé que si les deux ondes se réduisaient à une seule, ce qui exigerait un accouplement nul. Ce que l'on a appelé la *syntonie* est donc irréalisable.

Néanmoins, avec des accouplements faibles, c'est-à-dire en sacrifiant une partie de l'énergie, on peut arriver à réaliser une syntonie suffisamment approchée pour diminuer notablement les troubles occasionnés au récepteur par une transmission non accordée. Toutes choses égales d'ailleurs, il est facile de régler un récepteur de telle sorte qu'il ne puisse pas être actionné par des ondes dif-

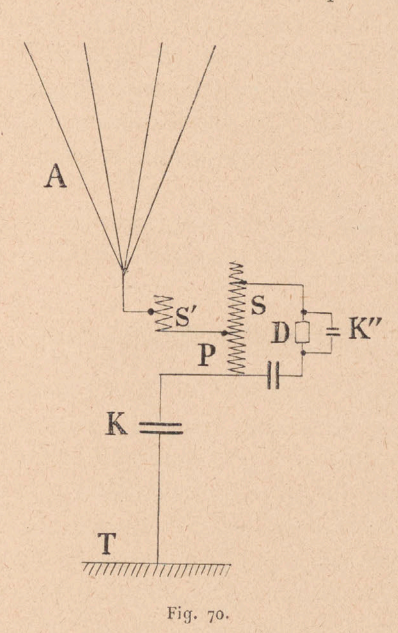


Fig. 70.

férant de 10 p. 100, de celles pour lesquelles il est réglé, à la condition toutefois que les ondes parasites ne soient pas trop énergiques.

On pourrait s'approcher davantage de la syntonie en produisant à la transmission des ondes entretenues, c'est-à-dire sans amortissement. Tel est le procédé Poulsen, dont il sera question plus loin ; mais ce procédé n'est pas encore entré dans le domaine de la pratique et il n'est pas possible d'en faire état pour le moment.

Systèmes employés. — Les divers expérimentateurs ou compagnies de télégraphie sans fil emploient des montages qui se rattachent tous aux procédés qui viennent d'être décrits. Le mot de système est donc impropre, puisque ce ne sont, en réalité, que les formes d'appareils et quelques détails de montage qui diffèrent dans le matériel des uns et des autres.

Nous allons décrire ci-après d'une manière schématique ces divers montages ou dispositifs, y compris quelques-uns de ceux qui étaient employés il y a quelques années et qui sont abandonnés aujourd'hui ; cette description permettra de se rendre compte de l'évolution des idées.

Dans un autre chapitre, nous indiquerons les montages détaillés des dispositifs actuellement en usage.

Dispositif Lodge-Muirhead

La première tentative de syntonisation est due à MM. Lodge et Muirhead ; toutefois, leurs dispositifs, peu pratiques d'ailleurs, ne paraissent pas avoir donné de bien bons résultats. Le principe consistait à rendre identiques les circuits de réception et de transmission. Mais il avait le grave défaut de ne pas faire entrer en ligne de compte les perturbations introduites par la présence de l'étincelle dans le circuit transmetteur, et par celle du cohéreur dans le circuit récepteur.

Ces dispositions ont été modifiées récemment, de manière à en faire disparaître les inconvénients.

Premier dispositif Marconi

M. Marconi, qui avait, dans ses premiers essais, placé directement le détecteur (cohéreur) sur l'antenne, reprit l'idée précédente, avec ses défauts, mais il améliora la réception de la manière suivante.

Il intercala sur l'antenne de réception, au voisinage du sol, le primaire P, très court, d'un petit transformateur

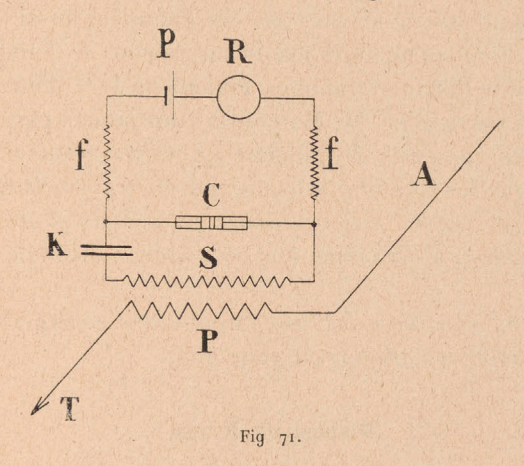


Fig 71.

dont le secondaire S était placé dans un circuit comprenant le cohéreur C et un condensateur K (fig. 71 et 72).

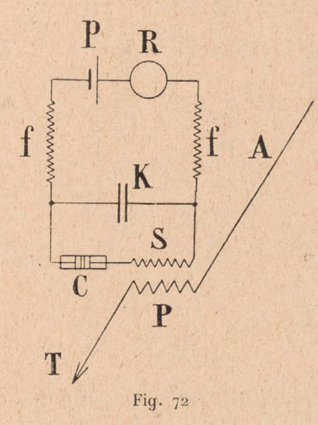


Fig. 72

Deux bobines d'impédance *f* empêchent toute dérivation des oscillations par le circuit du relais.

L'inventeur n'a donné aucune règle pour la construction de ces transformateurs ; les enroulements devaient être

faits d'une manière spéciale et les longueurs de fils fonction des longueurs d'antenne.

La transmission n'avait pas été changée, aussi les résultats, bien qu'encourageants en raison de l'augmentation de la distance franchie, étaient-ils loin d'être parfaits. En particulier, M. Marconi n'était jamais parvenu à régler ses appareils de manière qu'un récepteur n'enregistrât que les signaux transmis par un transmetteur déterminé et restât toujours muet pour ceux d'un autre transmetteur, alors même que ce dernier était réglé aussi par lui.

C'est avec ce dispositif que furent faites les expériences de la Manche en 1899 (voir page 253).

Dispositifs Braun

M. Braun paraît être le premier qui ait songé à chercher le moyen de diminuer l'amortissement considérable

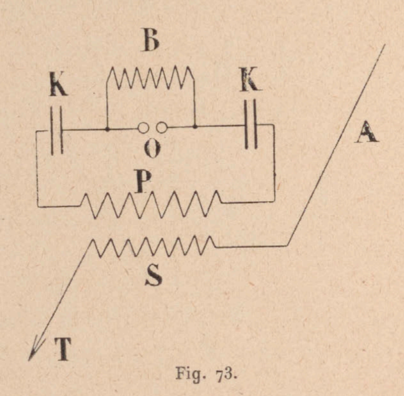


Fig. 73.

des oscillations de l'antenne de transmission ; de plus, il montra l'avantage d'employer des oscillations de grande longueur d'onde, qui permettent de mettre en jeu de plus grandes quantités d'énergie et d'obtenir des effets de diffraction plus considérables.

M. Braun a imaginé un assez grand nombre de dispo-

sitifs en vue d'obtenir ce résultat; nous ne décrirons que les plus intéressants.

Le premier (fig. 73) est caractérisé par ce fait que l'antenne est excitée par l'intermédiaire d'un transformateur. Les oscillations sont produites dans un circuit fermé comprenant : l'oscillateur O, relié à la bobine d'induction B, deux condensateurs K et le primaire P d'un transformateur d'Arsonval. Ce circuit a des éléments électriques bien déterminés et ne comporte que très peu de rayonnement. Les oscillations sont donc de période très nette. Elles induisent des oscillations de même période dans le secon-

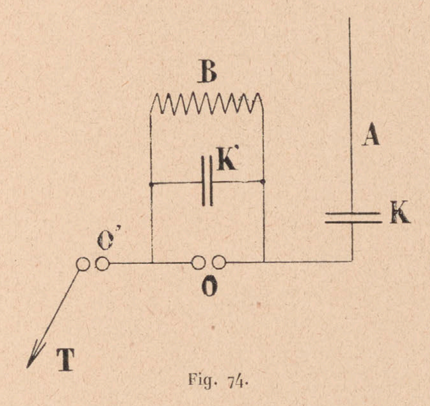


Fig. 74.

daire S, relié d'une part à l'antenne et d'autre part à une capacité désignée sur la figure par la lettre T.

Afin de pouvoir employer beaucoup d'énergie, il est nécessaire d'avoir de grandes capacités et par suite de grandes longueurs d'onde ; lorsque la longueur d'antenne est limitée, il suffit d'allonger le fil ST de manière à accorder le circuit de l'antenne sur la période choisie.

Un deuxième dispositif consiste à exciter l'antenne directement, mais en intercalant un condensateur K (fig. 74). La période des oscillations produites est alors réglée au moyen d'un condensateur K', mis en dérivation sur l'oscillateur.

Enfin, un second oscillateur O′ est embroché sur le fil qui aboutit à la capacité T.

Le dispositif avec transformateur présente, en plus des avantages déjà énumérés, celui de ne pas rendre l'antenne sinon dangereuse, tout au moins d'un contact très désagréable. On a en effet dans l'antenne des courants de Tesla, qui ne provoquent que des sensations légères. De

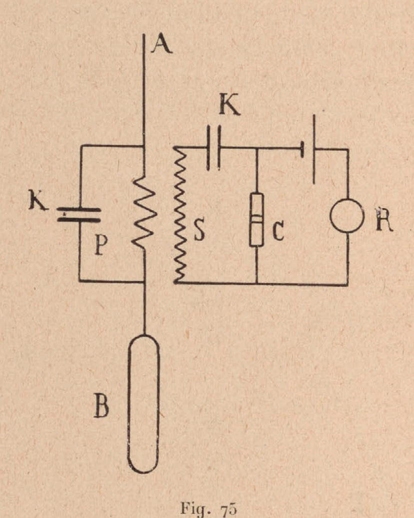


Fig. 75

plus, les défauts accidentels d'isolement de l'antenne deviennent moins graves.

Pour la réception, M. Braun employait la disposition suivante (fig. 75).

L'antenne A est reliée à la capacité B au travers du primaire P d'un petit transformateur, dont le secondaire S est lui-même relié aux deux bornes du cohéreur C par l'intermédiaire d'un condensateur K′, qui évite la fermeture du circuit de la pile et du relais R.

L'accord est obtenu en agissant, d'une part, sur le condensateur K mis en dérivation au primaire P et, d'autre part, sur la longueur du secondaire S.

Ce montage est identique à celui de M. Marconi (fig. 71), avec cette seule différence que la terre est remplacée par la capacité B.

Deuxième dispositif Marconi

Transmission. — M. Marconi, s'inspirant vraisemblablement des travaux de M. Braun, a adopté vers 1900 un

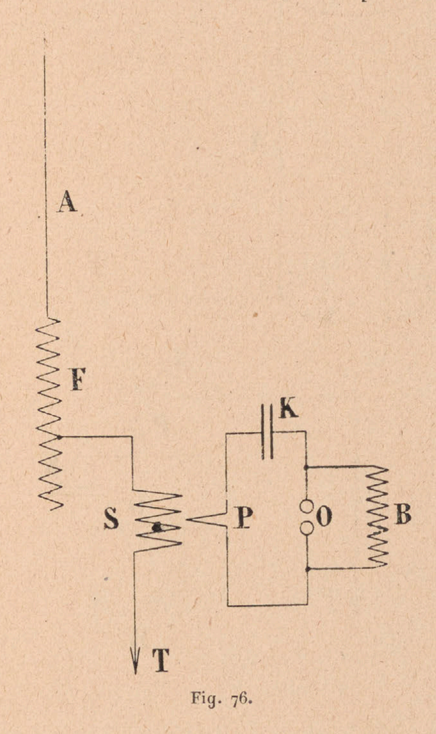


Fig. 76.

dispositif de transmission absolument analogue au précédent.

Le circuit où prennent naissance les oscillations se compose (fig. 76) : de l'oscillateur O, d'un condensateur K et du primaire P d'un petit transformateur, genre d'Arsonval. Le circuit rayonnant se compose de l'antenne

A, d'une self variable F, du secondaire S du transformateur, relié d'autre part au sol.

L'accord entre les deux circuits se fait en agissant sur le condensateur K de manière à faire varier la période, puis en ajoutant ou retranchant un certain nombre de

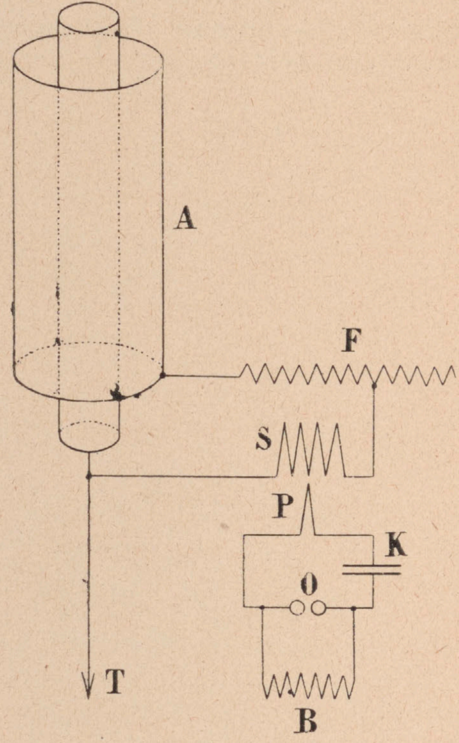


Fig. 77.

spires de la self F pour parfaire cet accord. Quelquefois aussi, on agit sur le mode d'enroulement et le nombre de tours du transformateur. Ce nombre de tours est, en général, très limité : un tour pour le primaire, de deux à six pour le secondaire.

L'inventeur a également employé, en vue d'augmenter la capacité du radiateur, des antennes constituées par

deux larges cylindres métalliques concentriques, le cylindre intérieur étant relié à la terre (fig. 77).

Le montage d'ensemble est analogue au précédent.

Ce dispositif aurait permis de communiquer à 50 km en mer, au moyen de cylindres de $1^m,25$ de haut et de $0^m,40$ de diamètre.

Réception. — M. Marconi emploie, pour la réception, le dispositif ci-après :

Le circuit collecteur se compose de l'antenne A

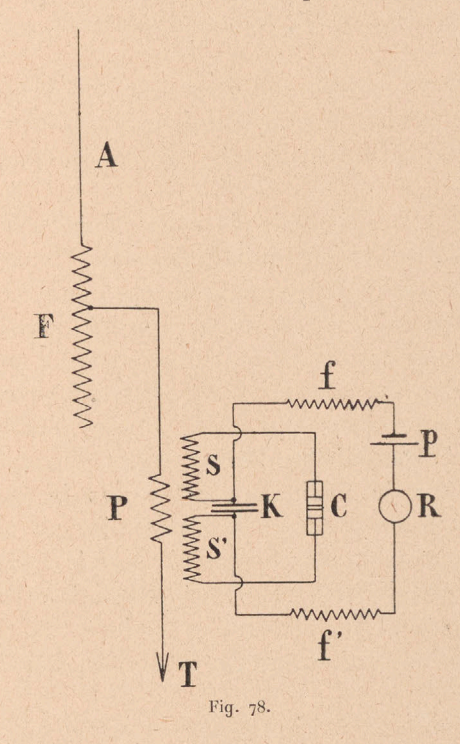


Fig. 78.

(fig. 78), d'une self variable F embrochée sur l'antenne et du primaire P d'un transformateur genre d'Arsonval (jigger). Le secondaire de ce transformateur est divisé en deux parties identiques S, S', dont les extrémités inté-

rieures sont reliées aux deux armatures d'un petit condensateur K et les extrémités extérieures aux bornes du cohéreur C. Le circuit pile-relais est également relié aux extrémités intérieures des demi-secondaires, par l'intermédiaire de deux bobines d'impédance $f f'$.

Pour accorder l'ensemble du récepteur sur la période des oscillations transmises, il est nécessaire de réaliser deux accords : 1° celui du circuit collecteur, comprenant l'antenne, la self F, le primaire P du jigger et la terre T; 2° celui du résonateur de Hertz, constitué par les deux demi-secondaires S, S', le condensateur K et le cohéreur C.

L'accord du circuit collecteur est facilement réalisé en choisissant une antenne identique à celle de la transmission ; on complète le réglage en agissant sur la self F.

Pour accorder ensuite le résonateur fermé sur le cohéreur, il suffit de choisir les enroulements S S' de manière que chacun d'eux soit équivalent, en tenant compte de l'effet de l'enroulement et de la capacité du cohéreur, à un quart de la longueur d'onde transmise. La capacité du condensateur K a très peu d'importance. L'ensemble du résonateur sera donc équivalent à une demi-longueur d'onde de la transmission, il entrera par suite en vibration avec une énergie maximum ; les ventres de tension qui se forment à ses extrémités, c'est-à-dire au cohéreur, seront donc maximums ; on parfait parfois le réglage au moyen d'un petit condensateur réglable mis en dérivation sur le cohéreur. L'impédance des bobines f empêche une perte partielle de l'énergie par dérivation dans le circuit du relais.

C'est au moyen de dispositifs semblables que M. Marconi a réalisé ses premières communications à grande distance, et en particulier celle entre la France et la Corse (175 km) [voir page 256], et entre l'île de Wight et la pointe Lizard (300 km).

Double communication. — M. Marconi est même parvenu, dans certaines conditions d'installation et à des distances moyennes, à établir une double communication au moyen d'une même antenne, c'est-à-dire à transmettre

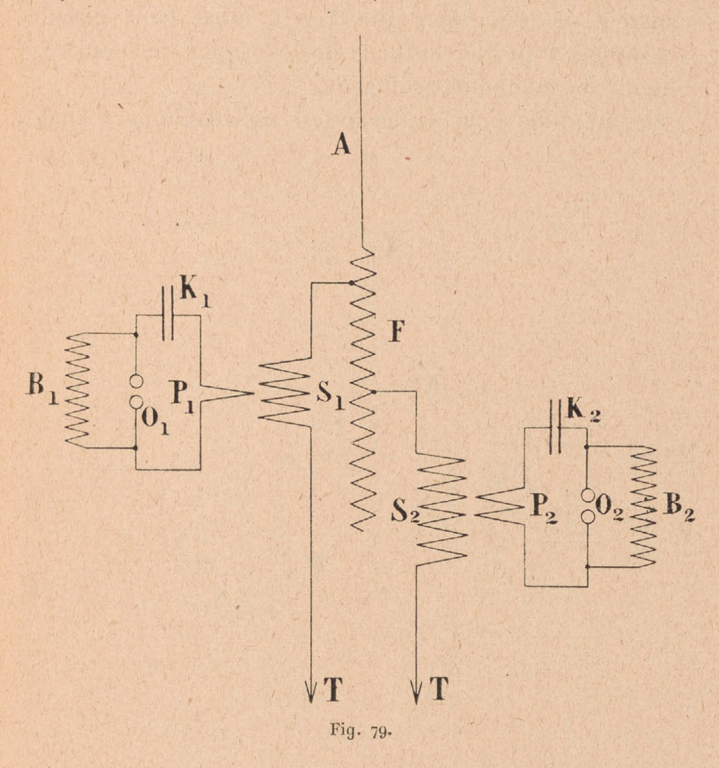


Fig. 79.

et recevoir à la fois deux télégrammes distincts par la même antenne.

Le montage employé est celui décrit dans les figures 79 et 80. A la transmission, les deux secondaires S_1 et S_2 sont reliés à la même antenne et à la même prise de terre. L'un d'eux est relié directement à l'antenne et l'autre par l'intermédiaire d'une self réglable F. Les oscillations produites par chacun des transmetteurs sont de périodes très différentes.

L'antenne sera donc le siège de deux mouvements vibratoires simultanés et distincts qui ne se gêneront pas mutuellement, en vertu du principe de la superposition des petits mouvements, de l'abbé Laborde. Toutefois, il convient de remarquer que l'on a ainsi trois circuits accouplés et qu'il est difficile de les régler de manière à obtenir un rendement suffisant.

Le montage pour la réception est absolument analo-

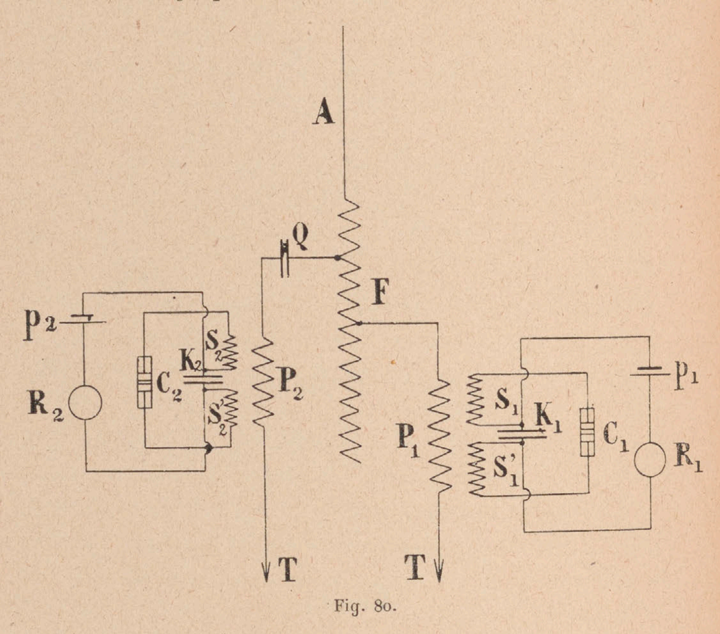


Fig. 80.

gue (fig. 80). Les deux récepteurs sont accordés l'un après l'autre pour l'une ou l'autre des périodes ; de plus, une self F est intercalée sur le circuit du récepteur à ondes longues, et un condensateur Q sur le circuit du récepteur à ondes courtes. On crée ainsi deux circuits accordés chacun pour l'une des périodes.

Dans la pratique réelle, il y aurait certainement avantage à employer des antennes distinctes pour chaque transmetteur ou chaque récepteur. On diminuerait ainsi

l'accouplement des deux récepteurs, en les rendant par suite plus indépendants.

Les réglages nécessités par ces dispositifs sont d'ailleurs très délicats et ne permettent leur emploi qu'à des distances limitées. La sélection entraîne en effet, comme on l'a vu, une grande perte d'énergie soit à la transmission, soit à la réception.

De plus, il convient de remarquer que M. Marconi n'a obtenu des résultats qu'en choisissant des périodes très différentes, et que les deux récepteurs pouvaient encore être influencés tous deux par une troisième transmission suffisamment énergique et placée à une distance encore assez considérable.

Premiers dispositifs Slaby

Transmission. — M. Slaby a successivement expérimenté un certain nombre de montages pour la transmission. Dans le premier de ces montages (fig. 81), le circuit radiateur était encore celui où prennent naissance les oscillations ; il se composait d'un oscillateur O, placé aux bornes de la bobine d'induction B, d'un condensateur K, d'une bobine de self F et de deux antennes A et H. Ce circuit était fermé par la terre. Il est difficile de voir les avantages que pouvait présenter ce montage, mais en revanche les inconvénients en sont évidents. Tout d'abord, les oscillations étant tout aussi amorties que dans le montage ordinaire, leur période est mal définie ; d'autre part, les effets des deux antennes A et H sur le récepteur devaient se contrarier ; enfin, si, pour éviter ce dernier inconvénient, on donnait à F une grande impédance, on retombait en réalité sur le montage ordinaire, avec cette différence qu'un condensateur est embroché sur l'antenne.

M. Slaby a queqlensuite imaginé ues autres montages

que l'on ne décrira pas, étant donné leur médiocre intérêt. L'inventeur les a du reste tous abandonnés pour le suivant (fig. 82).

Le circuit où prennent naissance les oscillations se compose de l'oscillateur O, placé en dérivation aux bornes de la bobine d'induction B, d'un condensateur K,

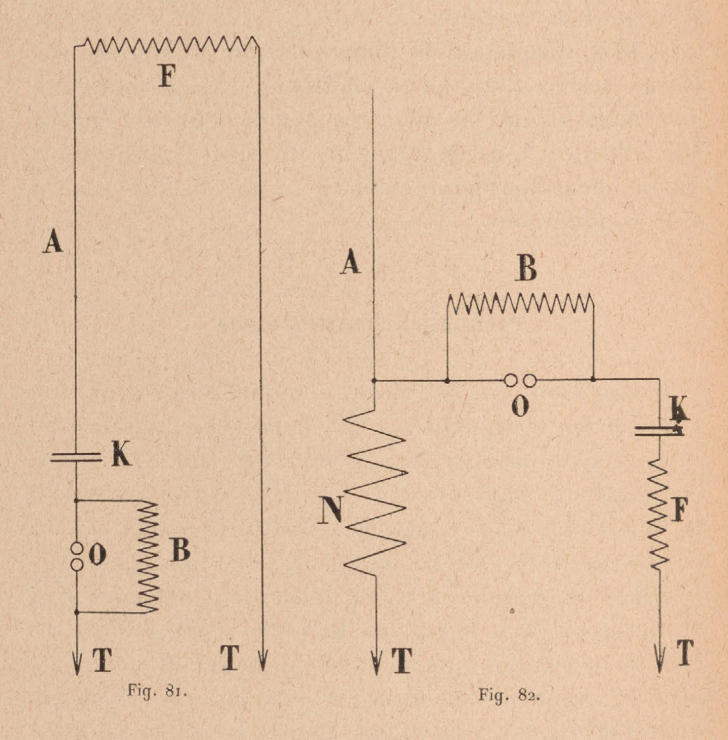


Fig. 81. Fig. 82.

d'une self F et d'une bobine à larges spires N ; ce circuit est fermé par le sol. L'antenne est placée en dérivation sur le circuit. C'est donc un procédé d'excitation indirecte par dérivation.

Le réglage se fait en ajoutant ou retranchant un certain nombre de spires de la bobine N, ou bien en modifiant la période des oscillations du circuit fermé, par la variation du condensateur K et de la self F.

Réception. — La solution imaginée par M. Slaby, pour la syntonisation du récepteur sur la période transmise, est très élégante. Elle est l'origine du montage pour action indirecte par dérivation [1].

Si l'on soumet une antenne A (fig. 83), reliée au sol à sa partie inférieure, à l'action d'un champ hertzien amorti, on a vu qu'en vertu de la résonance multiple, cette antenne devient le siège d'oscillations ayant la période propre de l'antenne et présentant un ventre de tension au sommet et un nœud au sol. Si l'on prolonge cette antenne par une dérivation D reliée à son pied, l'ensemble de

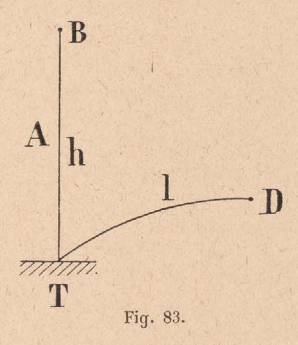


Fig. 83.

l'antenne et de la dérivation sera le siège d'oscillations qui auront la période propre de cet ensemble, c'est-à-dire seront telles qu'il y aura un ventre de tension à chaque extrémité de l'ensemble, soit en D et en B. Si la longueur l de la dérivation est choisie de manière qu'en l'ajoutant à la longueur h de l'antenne on ait la valeur d'une demi-longueur d'onde des oscillations de la transmission, on aura un maximum d'utilisation de l'énergie recueillie par l'antenne. En plaçant en D une borne du

1. On remarquera que ce principe est le même que celui utilisé par M. Turpain dans son système de télégraphie multiplex par ondes hertziennes avec fil. M. Turpain, dont les travaux sont antérieurs à ceux de M. Slaby, a publié plusieurs études très intéressantes sur les champs hertziens interférents, dans lesquelles le principe susvisé et ses applications sont décrits en détail.

cohéreur, dont l'autre borne est reliée au sol, on a un maximum d'effet.

Dans la pratique, M. Slaby remplace la dérivation rectiligne D par un résonateur Oudin U (fig. 84), dont le nombre de spires est convenablement choisi. La seconde borne du cohéreur C est reliée au sol par l'intermédiaire d'un condensateur K, destiné à éviter aux oscillations l'impédance du relais R. De plus, une bobine à larges

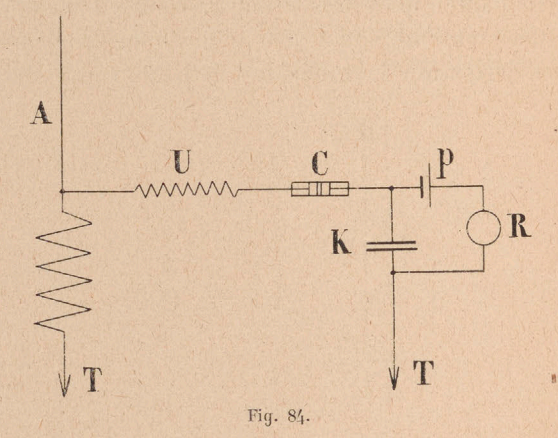


Fig. 84.

spires est intercalée sur l'antenne, entre la dérivation et le sol, pour parfaire le réglage.

Les schémas de montage peuvent être présentés sous la forme indiquée par les figures 86 ou 87, qui mettent en évidence l'emploi de procédés d'excitation ou d'action par dérivation au moyen de résonateurs Oudin.

Double réception. — M. Slaby est parvenu à réaliser, d'après le même principe, la réception simultanée de deux télégrammes transmis par deux stations distinctes au moyen d'oscillations de périodes très différentes.

Deux résonateurs U_1 et U_2 (fig. 85), convenablement choisis, étaient reliés à l'antenne. Chacun d'eux étant réglé pour réaliser l'accord avec l'une des oscillations, le

cohéreur correspondant n'enregistrait que les signaux transmis avec cette période accordée.

Les inconvénients signalés plus haut existent évidem-

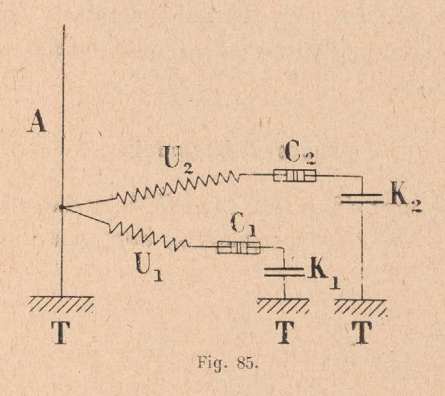


Fig. 85.

ment encore dans ce montage : perte d'énergie et insuffisance de la sélection. Il est infiniment probable que,

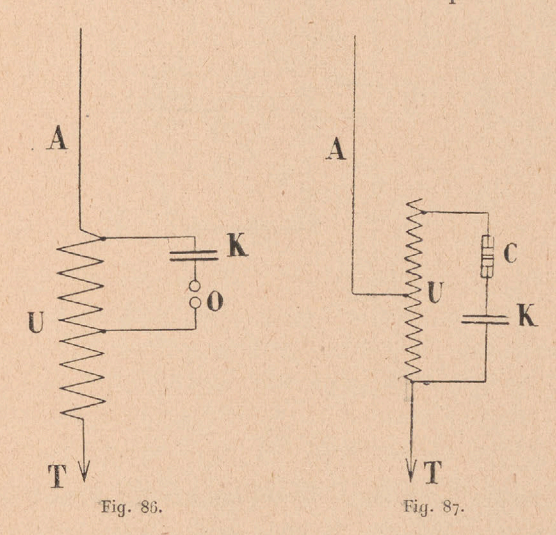


Fig. 86. Fig. 87.

tout comme avec le dispositif Marconi, les deux récepteurs ci-dessus eussent été actionnés par des oscillations transmises avec une période intermédiaire entre celles

pour lesquelles ils étaient réglés, ou même avec une période quelconque, à la condition d'augmenter l'énergie employée à la transmission ou de réduire la distance.

Les expériences de double réception faites par M. Slaby n'ont d'ailleurs eu lieu qu'à faible distance : 4 km et 12 km.

Dispositif Rochefort

M. Rochefort (fig. 88) a modifié le dispositif récepteur de M. Slaby en remplaçant, ainsi qu'il l'avait pro-

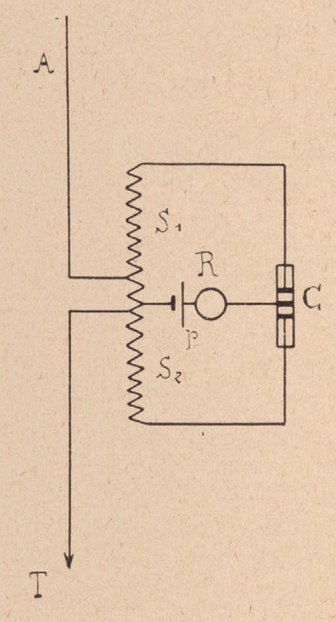


Fig. 88

posé depuis longtemps, le résonateur unipolaire par un résonateur bipolaire. Il peut ainsi soumettre les deux bornes du détecteur à des tensions égales et de signes contraires.

M. Rochefort a établi, pour la transmission et la ré-

ception, des dispositifs parfaitement étudiés tant au point de vue technique qu'au point de vue pratique.

Dispositif Magni

M. Magni excite également le cohéreur par ses deux extrémités, au moyen de deux dérivations représentant chacune un certain nombre de quarts d'onde, avec une différence totale d'une demi-longueur d'onde.

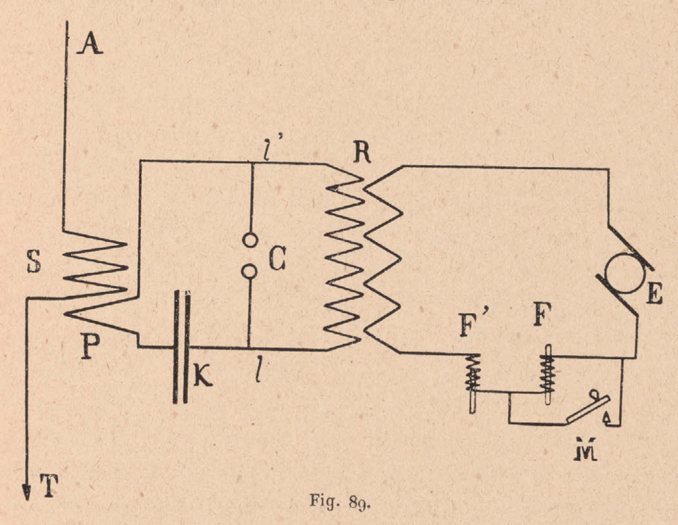


Fig. 89.

Le but de ce dispositif est de rendre l'effet sélectif plus net en rendant presque nulle l'action résultante des ondes ayant une longueur différente de celle pour laquelle l'accord a été fait. Mais en même temps on réduit notablement l'énergie utilisée et par suite la portée.

M. Magni a aussi proposé plusieurs dispositifs intéressants comportant l'emploi de deux antennes.

Troisième dispositif Marconi

Pour franchir de grandes distances, M. Marconi a remplacé les bobines d'induction à courant continu par des

transformateurs industriels à courant alternatif. Le montage employé était soit celui de la figure 89 (excitation indirecte par induction), soit celui de la figure 90 (même procédé d'excitation avec double transformation).

La manipulation se fait en court-circuitant une bobine de self, ou par d'autres procédés sur lesquels nous reviendrons plus loin, en décrivant les détails des appareils de transmission.

M. Marconi emploie pour la réception le montage pour

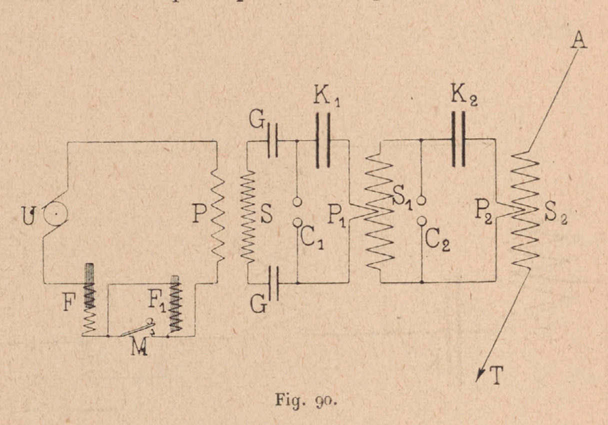


Fig. 90.

action directe par dérivation, avec un détecteur magnétique (page 224), tout en conservant le cohéreur dans certains cas, avec le montage du deuxième dispositif décrit plus haut.

Dispositif Telefunken

La compagnie Telefunken, fondée depuis 1903 pour l'exploitation des brevets Braun et Slaby-Arco, est arrivée, après des études très complètes, à établir des dispositifs très satisfaisants au point de vue technique, en modifiant peu à peu ceux de Braun et de Slaby.

Elle emploie actuellement, pour la transmission, le montage pour excitation indirecte par dérivation avec

accouplements lâches (page 119), l'énergie étant toujours fournie par un courant alternatif.

Pour la réception, quel que soit le détecteur employé (cohéreur ou détecteur électrolytique), le montage est fait d'après le procédé d'action indirecte par induction (page 126).

Nous décrirons plus loin les détails de montage et les appareils.

Dispositif Fessenden

Le point de départ du principe du dispositif de M. Fessenden paraît quelque peu mystérieux : les ondes qu'il est destiné à produire seraient différentes de celles de Hertz ; il les appelle *ondes demi-libres de l'éther*. Elles seraient telles que l'énergie électrique serait maximum en même temps que l'énergie magnétique et qu'aucune partie ne pourrait être recouvrée de l'énergie radiée, sauf celle qui serait dirigée. Pour une bonne transmission ou réception des ondes, il serait essentiel que la surface intermédiaire qu'elles doivent suivre soit absolument conductrice, surtout dans le voisinage du point où elles sont créées. Cette partie conductrice doit s'étendre à une distance d'au moins un quart d'onde de la source, dans la direction d'émission. On satisferait à cette condition en donnant au fil de terre une longueur égale à $\frac{\lambda}{4}$.

Antenne. — L'antenne doit avoir une grande capacité et une faible inductance. Ce résultat est obtenu en augmentant sa surface et le nombre des fils qui la relient à l'oscillateur.

Transmission. — Le montage employé est celui de l'excitation directe; l'antenne A (fig. 91) est reliée à une des boules de l'oscillateur spécial C (page 186), la seconde

boule est reliée à la terre par une série de lames métalliques *m* enfermées dans un récipient D plein d'huile. La longueur de ces lames à mettre en circuit peut être réglée par des ponts mobiles *n*. On règle la longueur d'onde employée en mettant en circuit une plus ou moins grande longueur de lames *m*.

La production des signaux Morse ne se fait pas en

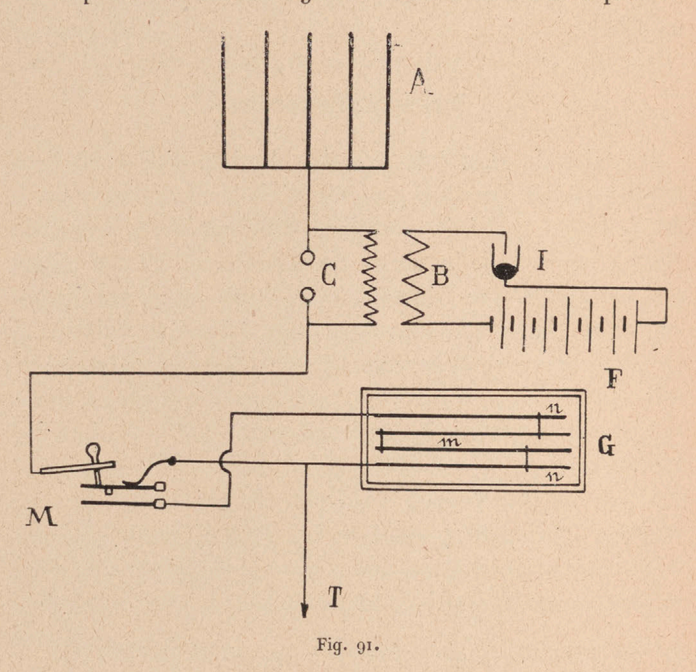


Fig. 91.

coupant et refermant le circuit primaire de la bobine : l'interrupteur I fonctionne en permanence et il jaillit des étincelles à l'oscillateur C pendant toute la durée de la transmission d'un télégramme. La manipulation est faite au moyen d'une clef spéciale M qui agit de la manière suivante : au repos, cette clef met hors circuit les lames *m* de la boîte G ; elle replace au contraire en circuit, quand elle est abaissée, la longueur de lames choisie. Sans entrer dans les détails de construction, il suffit de dire

que cette clef est faite de telle sorte que la communication de l'oscillateur avec la terre n'est jamais interrompue, quelle que soit la position du manipulateur.

Réception. — Pendant la réception, l'antenne A (fig. 92) est reliée à une extrémité d'un circuit dont

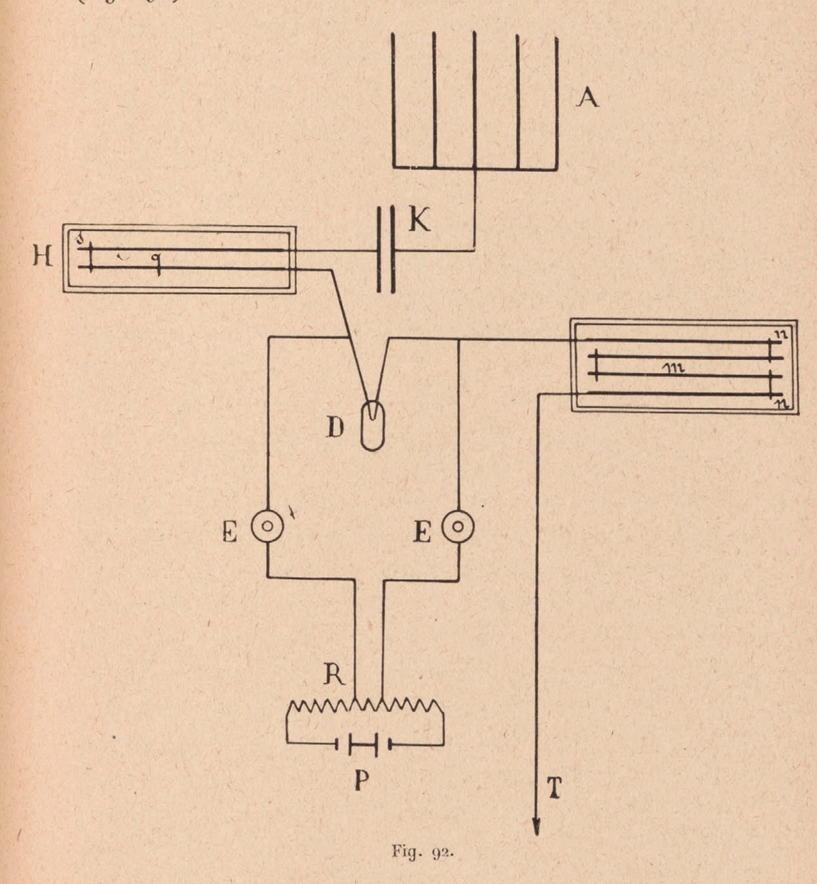


Fig. 92.

l'autre extrémité est à la terre et comprenant : 1° un condensateur K ; 2° une certaine longueur de lames *q*, réglable au moyen d'un pont *s* et contenues dans un récipient H semblable au récipient G de la transmission ;

3° le détecteur D décrit page 226 ; 4° les lames *m* ayant déjà servi pour le réglage de la transmission et contenues dans le récipient G.

En dérivation sur le détecteur, est placé un circuit comprenant deux écouteurs téléphoniques E, et une faible force électromotrice obtenue en prenant une dérivation sur une résistance R, réunissant les pôles de même nom de deux éléments de piles à peu près identiques.

Les lames *q* servent, par leur capacité et leur self-induction, à parfaire l'accord de la réception sur la transmission.

Nous ne possédons aucune donnée précise sur les résultats obtenus avec ces dispositifs qui ont d'ailleurs été modifiés ultérieurement, en vue d'appliquer l'excitation indirecte à la transmission et l'action indirecte à la réception.

Dispositifs à oscillations entretenues

Dans les systèmes que nous venons de décrire, les ondes sont engendrées par la décharge périodique d'un condensateur. Les oscillations que l'on obtient ainsi sont forcément amorties et cet amortissement, qui est considérable, empêche de réaliser une syntonie parfaite, en donnant lieu au phénomène de la résonance multiple. On a alors cherché à produire des oscillations entretenues, c'est-à-dire dépourvues d'amortissement à l'origine.

A cet effet, M. de Valbreuze a repris la comparaison suivante due à M. Maurice Leblanc. Pour produire un son, on peut, ou bien faire vibrer une corde tendue qui effectue un certain nombre d'oscillations amorties pour revenir à sa position d'équilibre, ou bien se servir d'un appareil à anche dans lequel les vibrations régulières sont engendrées par l'air qui s'écoule sous pression

constante dans une conduite de résistance périodiquement variable. Ces deux moyens existent également en électricité pour la production de courants alternatifs de grande fréquence. La corde vibrante a son analogue dans l'excitateur de Hertz, qui produit des oscillations amorties, irrégulières et complexes. Quant au principe de l'appareil à anche, il se retrouve dans deux expériences : 1° celle de Warren de la Rue, qui, ayant soumis un tube à vide à l'action d'une pile de 1 080 éléments, constata que la veine lumineuse se stratifiait dès qu'on montait un condensateur en parallèle, le circuit étant alors parcouru par un courant de grande fréquence ; 2° celle de Duddell, dans laquelle un arc électrique, alimenté par du courant continu et ayant en dérivation une self et une capacité, produit un courant ondulé de période $2\pi\sqrt{LC}$.

S'appuyant sur ces deux expériences, M. de Valbreuze songea à utiliser les tubes à électrodes de mercure employés par M. Cooper Hewitt pour l'éclairage.

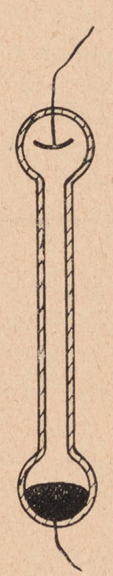
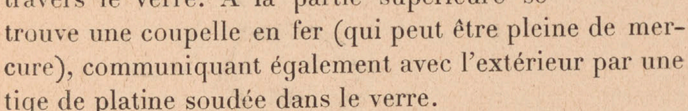


Fig. 93.

La lampe à vapeur de mercure Cooper Hewitt est constituée par un tube portant un renflement à chacune de ses extrémités (fig. 93). A la partie inférieure se trouve du mercure dans lequel plonge une électrode en platine communiquant avec l'extérieur à



travers le verre. A la partie supérieure se trouve une coupelle en fer (qui peut être pleine de mercure), communiquant également avec l'extérieur par une tige de platine soudée dans le verre.

Lorsqu'on fait le vide à un certain degré dans le tube et que celui-ci est plein de vapeur de mercure, on amorce la lampe par un extra-courant de rupture à haute tension, et la vapeur de mercure devient lumineuse tant qu'on maintient une différence de potentiel comprise

entre 15 et 500 volts. L'éclat obtenu est d'environ 1/1 000 de celui d'une lampe à arc, la consommation est d'environ 0,5 watt par bougie.

Lorsqu'on fait usage de courants alternatifs, la lampe

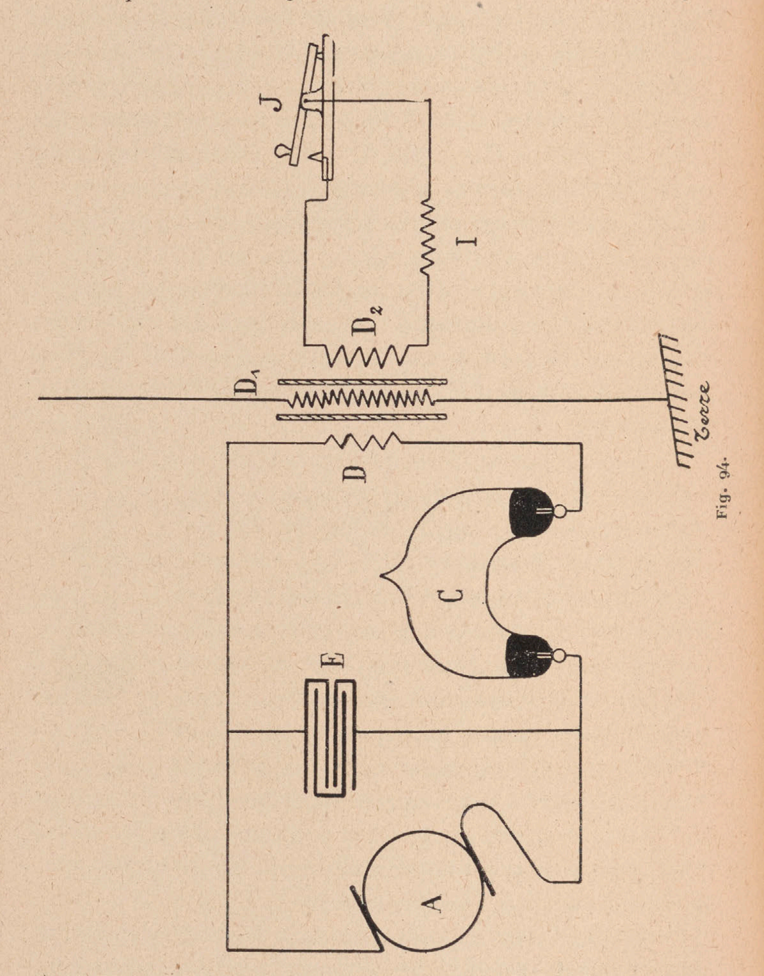


Fig. 94.

se comporte comme une soupape cathodique et ne laisse passer que la moitié positive du courant, de la coupelle d'acier au mercure.

M. Cooper Hewitt avait indiqué également la télégraphie sans fil au nombre des applications du tube à vapeur de mercure ; on devait alors placer un condensateur en dérivation aux bornes du tube, afin d'obtenir des courants de haute fréquence.

C'est cette application que M. de Valbreuze s'est proposé de réaliser. Son transmetteur se compose essentiellement d'une source de courant A (fig. 94), d'un tube à vide à électrodes de mercure C, avec un condensateur E en dérivation, et du primaire D d'un transformateur sans fer. Ce transformateur comporte deux bobines secondaires : l'une D_1, comprenant un certain nombre de tours de fil (réglable à volonté), a ses extrémités reliées à l'antenne et à la terre ; l'autre D_2, comprenant quelques tours de gros fil, fait partie d'un circuit amortisseur I qui comprend une self réglable et un interrupteur-manipulateur J dans l'huile.

Ce montage a pour but de ne pas désamorcer le tube dans les intervalles des signaux ; on peut en employer d'autres, par exemple une forte bobine de self en série sur le circuit primaire et mise en court-circuit par le manipulateur J.

Une autre disposition de ce producteur d'ondes, permettant de manipuler directement sur le circuit oscillant, consiste à munir le tube de deux paires d'électrodes : l'une servant à maintenir le tube toujours amorcé au moyen d'une première source de courant, l'autre étant reliée au circuit oscillant entretenu par une seconde source distincte de la première.

Procédé Poulsen. — Les résultats pratiques obtenus par les procédés que l'on vient d'indiquer ont été médiocres, à tel point qu'aucune application réelle n'a pu être réalisée, en raison de l'instabilité de l'arc. M. Poulsen est parvenu, après de longues recherches, à augmenter considérablement la stabilité de l'arc en le faisant jaillir

dans une atmosphère d'hydrogène. Bien que les résultats ne soient pas encore parfaits, il est vraisemblable qu'ils pourront être appliqués pratiquement à la télégraphie sans fil dans un avenir rapproché. Aussi semble-t-il intéressant de donner le résumé des procédés de M. Poulsen.

Après avoir expérimenté le procédé de production d'un arc de Duddell entre charbons horizontaux dont les extrémités étaient placées dans une flamme d'alcool ou de gaz, ou dans l'ammoniaque, l'auteur a reconnu que l'atmosphère enveloppante la plus avantageuse était l'hydrogène ou les carbures d'hydrogène. Il emploie actuellement un récipient en marbre, plein de gaz d'éclairage, dans lequel sont les deux charbons, auxquels on donne un mouvement de rotation sur eux-mêmes. Le gaz enveloppant doit être constamment renouvelé, car il devient rapidement inactif. Il importe de refroidir constamment l'arc ; pour cela, l'anode peut être en cuivre et creuse de manière à y établir une circulation d'eau froide.

D'autre part, il est très avantageux de placer l'arc dans un champ magnétique transversal intense, pour le bien fixer et augmenter la chute de tension dans l'arc sur une faible longueur. Par exemple, on obtient un arc de 3 mm avec 440 volts.

Le montage de l'arc pour la production d'oscillations entretenues est donné par la figure 95 : A est l'arc entre deux électro-aimants E en série avec le courant d'alimentation, K un condensateur. On obtient ainsi aisément, avec un courant de 450 volts, une fréquence pouvant atteindre 700 000 par seconde. L'énergie convertie en oscillations électriques diminue quand la fréquence augmente ; de plus, pour une fréquence donnée, cette énergie croît avec l'amortissement jusqu'à un certain maximum, puis diminue très vite. L'intensité des oscillations croît aussi, jusqu'à une certaine limite, avec l'intensité du cou-

rant dans l'arc. On augmente encore l'énergie en plaçant plusieurs arcs en parallèle ou en série.

Avec un seul arc et 440 volts, on obtient une énergie d'oscillations de 1 200 watts pour une fréquence de 160 000 périodes par seconde et 900 watts pour 240 000.

Pour exciter une antenne par ce procédé, on peut employer à volonté l'excitation directe ou l'excitation indirecte. Dans ce dernier cas, l'accouplement peut être très rigide ou très lâche, de manière à avoir une période

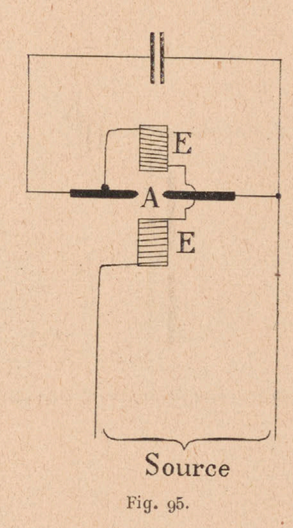


Fig. 95.

bien nette. C'est un avantage des oscillations entretenues. Avec des oscillations plus ou moins amorties, on n'obtient un bon accord qu'avec un accouplement lâche, et celui-ci utilise mal l'énergie disponible.

Il vaut mieux en général monter l'arc chantant, avec accouplement rigide, par dérivation par exemple, comme l'indique la figure 96. Le circuit excitateur est formé par l'arc C, le condensateur K et les spires P. Le circuit de l'antenne comprend l'antenne A, les spires S et la prise de terre T.

La manipulation, pour produire les signaux Morse,

peut être faite par un grand nombre de procédés : variation de longueur de l'arc rendant celui-ci actif ou inactif, variation du courant d'alimentation, du champ magnétique, etc.

Pour la réception, il y a intérêt, pour utiliser complètement les avantages de la résonance, à accoupler très faiblement le circuit secondaire à l'antenne. Grâce à la

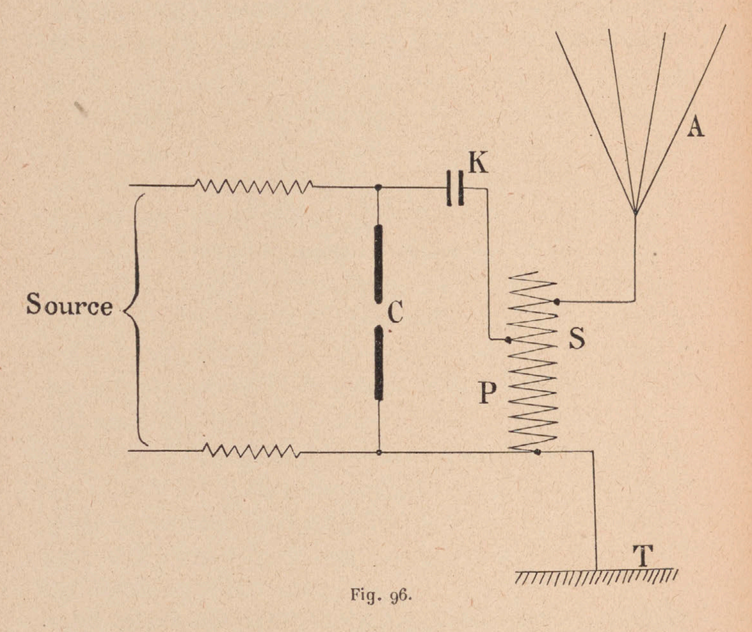


Fig. 96.

continuité des oscillations produites, on peut disposer le détecteur de manière qu'il ne soit mis en circuit que d'une façon intermittente. On évite ainsi l'amortissement résultant de la présence permanente du détecteur dans le circuit récepteur. Celui-ci peut donc osciller librement avec un amortissement très faible. En intercalant brusquement le détecteur, on profite de l'énergie accumulée, après quoi on met le détecteur hors circuit.

L'organe qui établit ce contact intermittent est appelé *ticker ;* il peut être un interrupteur actionné électroma-

gnétiquement, ou une roue dentée avec un ressort appuyant sur les dents. La nature des contacts permettant de faire ces ruptures et rétablissements de courant n'est pas indifférente ; il y a intérêt à employer les contacts or sur or ou maillechort sur argent.

L'inventeur préconise le montage suivant, qui ne comporte aucun détecteur (fig. 97). Sur l'antenne est intercalé

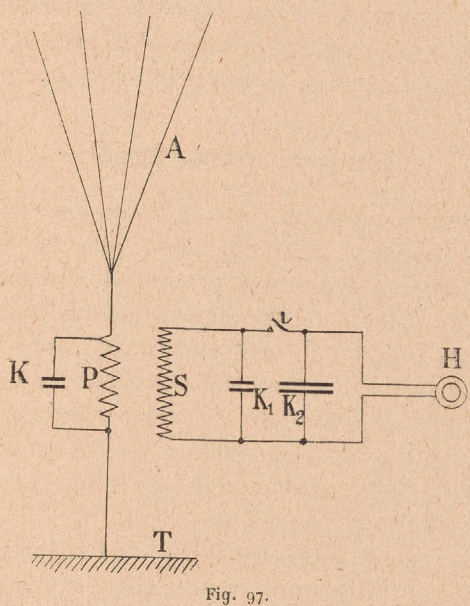


Fig. 97.

le primaire P d'un transformateur avec un condensateur K à ses bornes. Le secondaire S du transformateur est fermé sur un condensateur K_1 choisi de manière à établir, avec S, la résonance sur les oscillations transmises. L'accouplement est choisi très faible. Le ticker *i* permet de court-circuiter périodiquement la self S par un condensateur K_2 de grande capacité par rapport à K_1. Un téléphone H est monté aux bornes de ce condensateur.

On peut aussi employer les détecteurs ordinaires reliés périodiquement au circuit par le ticker.

La précision de la résonance peut atteindre 1 p. 100. Une même antenne pourrait recevoir simultanément trois télégrammes avec des différences de longueur d'onde de 3 à 4 p. 100. De plus, les récepteurs montés par ce procédé ne seraient plus influencés par les transmissions amorties ni par les perturbations électriques naturelles, grâce aux accouplements très lâches et au ticker.

Enfin, un avantage sérieux serait la très faible tension de l'antenne, qui, pour une énergie dépensée de 700 watts et radiée de 100 watts, ne serait que de 2 000 volts.

Syntonie système Blondel

M. Blondel a indiqué, dès 1898, un procédé de syntonie qui consiste à accorder non plus les fréquences des oscillations électriques propres du transmetteur et du récepteur, mais des fréquences artificielles beaucoup plus basses, tout à fait arbitraires et indépendantes des antennes, à savoir : la fréquence des charges de l'antenne et celle des vibrations d'un récepteur sélectif tel que le monotéléphone de M. Mercadier. Il suffit de maintenir la fréquence de l'interrupteur bien constante et égale à la fréquence propre du récepteur.

On peut aussi employer, associé au téléphone, un cohéreur ou anticohéreur autodécohérent ou encore un détecteur électrolytique, magnétique ou thermique.

Chaque groupe d'ondes de haute fréquence, rapidement amorties, agit en bloc, comme une simple percussion, sur le téléphone à vibration lente ; celle-ci reste d'ailleurs sensiblement sinusoïdale, grâce à l'inertie.

On peut aussi remplacer ou renforcer l'élasticité mécanique par une élasticité électrique en plaçant, en dérivation sur le détecteur d'ondes employé, une capacité calculée de manière à former un circuit en pseudo-résonance avec le poste d'émission.

Cette méthode se prête à une différenciation facile des

signaux dans une station réceptrice, car la syntonie acoustique est plus nette en général que la syntonie électrique.

Ondes dirigées

Bien que la propriété que possède une antenne de rayonner des ondes dans toutes les directions, ou d'être mise en vibration par des ondes venant d'une direction quelconque, soit précieuse pour les stations radiotélégraphiques maritimes, il est aisé de concevoir des circonstances où il serait avantageux de ne rayonner les ondes que dans une seule direction ou de recevoir seulement celles qui viennent d'une direction déterminée.

Un certain nombre de solutions ont été proposées, mais toutes sont encore imparfaites et entraînent une complication sérieuse des antennes et par suite des difficultés d'installation pratique. Nous allons résumer ces procédés.

Procédé Blondel. — M. Blondel a proposé en 1898 d'effectuer la transmission dans deux antennes verticales placées à une distance l'une de l'autre égale à une demi-longueur d'onde. L'excitation était réglée de manière que le mouvement vibratoire des deux antennes fût décalé d'une demi-période de l'une à l'autre. Il en résultait que, dans la direction du plan des antennes, les ondes se superposaient, tandis qu'elles interféraient en s'annulant dans la direction perpendiculaire.

Pour la réception, les circuits étaient disposés de manière à produire un effet analogue.

Les essais faits à petite distance ont été concluants, mais la complication des installations a fait abandonner la réalisation d'expériences à grande distance.

Antennes horizontales. — En 1902, M. Garcia a observé que deux antennes simples horizontales de faible hauteur,

placées dans le prolongement l'une de l'autre et dirigées en sens inverse, donnaient des résultats très supérieurs à ceux que l'on pouvait obtenir en plaçant ces antennes dans une tout autre direction.

Nous avons nous-même observé, à la même époque, un effet analogue avec des antennes horizontales symétriques de faible hauteur (fig. 54), qui donnent, toutes choses égales d'ailleurs, des résultats nettement meilleurs, comme portée, que les antennes horizontales simples.

M. Marconi a repris récemment cette idée et a fait des expériences très complètes au moyen de deux antennes horizontales ou bien d'une antenne verticale et d'une antenne horizontale. Il a vérifié ainsi l'intérêt que l'on a à placer les antennes dans le même plan et à les diriger en sens inverse de la direction de l'antenne correspondante.

Ces effets ne sont d'ailleurs bien marqués qu'avec des antennes horizontales dont la hauteur au-dessus du sol est très faible par rapport à la longueur, celle-ci devant toujours être assez considérable. Il y a intérêt à employer l'excitation directe, c'est-à-dire des oscillations très amorties.

Les perturbations électriques naturelles se font sentir avec moins d'intensité que dans les antennes verticales. M. Marconi a observé que ces perturbations venaient de directions déterminées, variables en divers moments.

Procédé Braun. — M. Braun a fait une étude très complète des moyens de produire l'interférence d'ondes électriques émanant de sources différentes, en réglant convenablement leurs différences de phases et leurs distances, et a montré que des antennes excitées séparément et placées suivant un cylindre parabolique étaient préférables au miroir parabolique de Hertz. Il a exécuté des expériences avec un dispositif simplifié, constitué par trois

fils transmetteurs placés aux sommets d'un triangle équilatéral. Avec une excitation symétrique, il créait ainsi le cas le plus simple d'un dispositif parabolique.

Les difficultés de réglage des différences de phases n'ont pas permis de donner une extension pratique à ce procédé.

Procédé Artom. — M. Artom, pour concentrer au voisinage d'une direction donnée l'énergie rayonnée, emploie

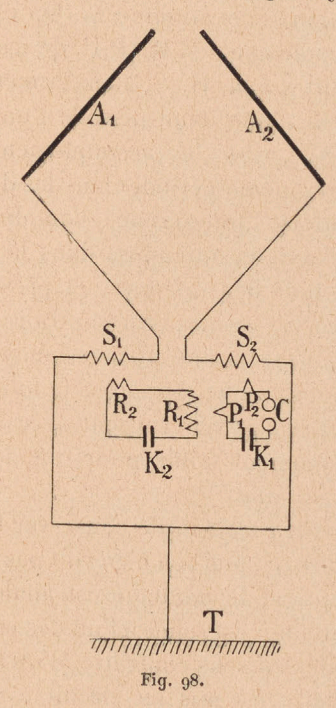


Fig. 98.

deux antennes A_1, A_2 ayant la forme indiquée par la figure 98. Les branches supérieures ont un grand nombre de fils, les branches inférieures étant constituées par un fil unique. Les extrémités supérieures des antennes sont très voisines l'une de l'autre.

Ces deux antennes sont reliées à la terre par l'inter-

médiaire des secondaires S_1, S_2 de deux transformateurs genre Tesla. L'une des antennes, A_2, est excitée indirectement, par induction et accouplement faible, au moyen d'un circuit oscillant $CK_1P_1P_2$. Ce circuit contient les primaires de deux transformateurs : le primaire P_2 qui agit sur l'antenne A_2, et le primaire P_1 qui agit sur un secondaire R_1 fermé sur un condensateur K_2 et un enroulement R_2. Ce dernier agit sur un autre enroulement S_1 intercalé sur la deuxième antenne A_1. On règle la valeur de K_2 et des enroulements R_1R_2, P_1P_2 de manière que les oscillations induites dans S_1, S_2 aient la même amplitude et soient décalées d'une demi-période l'une par rapport à l'autre. On règle aussi les accouplements faibles de manière à avoir la même période dans les deux antennes.

On obtient alors l'interférence complète des ondes rayonnées par les deux antennes, dans la direction perpendiculaire au plan des antennes, et presque complète dans les directions voisines. Au contraire, dans le plan des antennes, qui sont à une distance moyenne l'une de l'autre, assez notable par rapport à la longueur d'onde, les ondes rayonnées se superposent avec une différence de phase suffisamment faible pour que leur résultante ait une énergie notable.

Il est important, paraît-il, de conserver la forme d'antennes de la figure 98, mais on n'en voit pas bien la raison.

Pour la réception, le montage est analogue (fig. 99). Chacune des antennes est reliée à l'un des primaires P_1,P_2, égaux et enroulés en sens contraire, d'un transformateur dont le secondaire est mis en circuit avec un condensateur réglable K et le détecteur D. Lorsque des ondes viennent frapper les antennes, venant d'une direction voisine de la perpendiculaire à leur plan, les actions sur chacune d'elles sont égales, les effets des deux primaires se détruisent puisqu'ils sont montés en sens inverse, le détecteur ne peut donc pas être actionné. Si, au contraire, elles viennent d'une direction voisine du plan des

antennes, celles-ci entreront en vibration avec une certaine différence de phase qui se retrouvera dans les primaires P_1P_2 du transformateur et, la résultante des actions n'étant plus nulle, le détecteur fonctionnera.

Il semble que ce procédé puisse en effet être efficace,

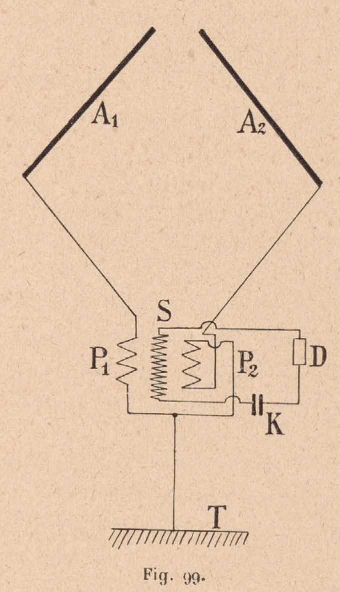


Fig. 99.

mais le rendement de l'énergie dépensée à la transmission est certainement médiocre; c'est d'ailleurs un inconvénient de peu d'importance.

Des expériences faites en Italie ont donné des résultats très encourageants. D'autres sont en préparation entre le Havre, Dieppe et Cherbourg.

CHAPITRE VII

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES MONTAGES ET APPAREILS DE TRANSMISSION

Nous avons exposé dans le chapitre précédent les procédés permettant de produire des oscillations dans l'antenne, pour la transmission des signaux; il nous reste à indiquer comment l'énergie électrique est communiquée aux circuits oscillants et à décrire avec quelques détails les appareils et organes spéciaux dont on fait usage pour la réalisation de ces procédés et montages.

Sources d'énergie. — Le condensateur, dont la décharge donne naissance aux oscillations, doit être chargé périodiquement par une source d'électricité à haute tension, sauf cependant dans le cas où l'on emploie des oscillations non amorties ; s'il s'agit de l'arc chantant de Duddell, il suffit de relier celui-ci à la source d'énergie à basse tension par l'intermédiaire de bobines de self. La manipulation se fait par un procédé quelconque, sans difficultés, étant donnée la faible intensité du courant d'alimentation de l'arc.

Dans les autres cas, on peut employer comme source d'électricité à haute tension soit une machine statique, soit une bobine Ruhmkorff, soit enfin un transformateur de courants alternatifs.

Les machines statiques ne peuvent guère être employées que pour des études de laboratoire, étant donnés leur faible rendement et les difficultés de les maintenir en bon état de fonctionnement.

Les bobines d'induction ne peuvent fournir qu'une énergie limitée, leur usage est donc borné aux stations de faible portée, et encore tend-on de plus en plus à les remplacer par des transformateurs de courants alternatifs. Ceux-ci présentent en effet l'avantage de la simplicité et permettent de mettre en jeu une énergie aussi grande qu'on peut le désirer, et cela avec un bon rendement, grâce aux phénomènes de résonance que l'on peut établir entre la période du courant alternatif et les transformateurs et condensateurs.

Emploi de bobines Ruhmkorff. — Le courant nécessaire au fonctionnement d'une bobine de Ruhmkorff peut

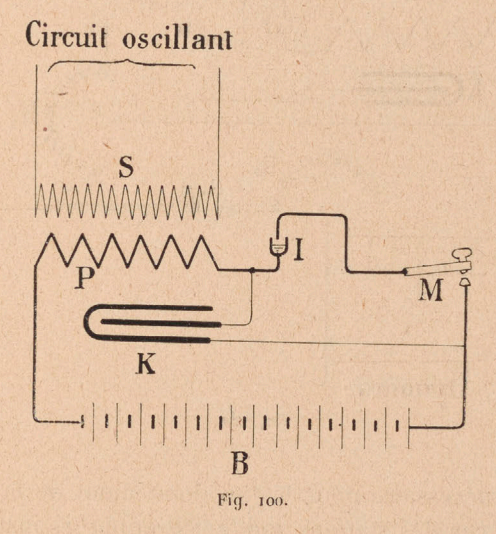


Fig. 100.

être fourni soit par des piles ou des accumulateurs, soit directement par une dynamo.

Dans le premier cas, les appareils sont montés suivant le schéma de la figure 100. Dans le circuit primaire P de la bobine sont intercalés : l'interrupteur I, le manipulateur M et la batterie B. Le condensateur de primaire K est relié au circuit de manière à être aux bornes de l'en-

semble de l'interrupteur et du manipulateur. Le circuit secondaire est relié au circuit oscillant, soit aux bornes de l'éclateur, soit aux bornes du condensateur.

Si l'on utilise directement le courant de la dynamo, il faut considérer deux cas.

La puissance de la dynamo est très supérieure à celle

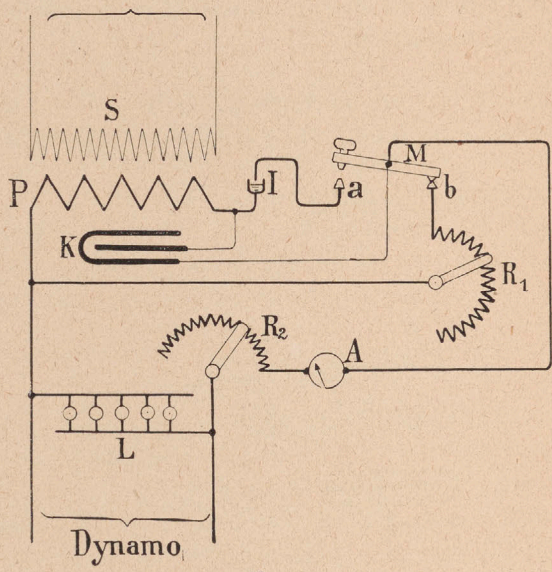


Fig. 101.

qui est nécessaire pour le fonctionnement de la bobine (c'est le cas des stations radiotélégraphiques installées à bord des navires). Le montage est le même que dans le cas précédent, les fils *f* étant reliés à la canalisation électrique au lieu de l'être à la batterie. Il est prudent toutefois de mettre en dérivation sur les fils *f* trois ou quatre lampes à incandescence, jouant le rôle de shunt pour les extra-courants de la bobine qui pourraient détruire l'isolement des canalisations ou de la dynamo elle-même.

Quand la dynamo n'a que la puissance nécessaire au fonctionnement de la bobine ou une puissance peu supérieure, on ne peut employer le même montage que cidessus, car la dynamo n'étant en charge que pendant la production des signaux et n'ayant aucun travail à fournir pendant les intervalles de ces signaux, il en résulterait des à-coups dans sa marche et dans celle du moteur mécanique qui l'actionne. Pour éviter ces à-coups nuisibles à la régularité de fonctionnement, il est nécessaire d'employer un montage, tel que celui de la figure 101, pour conserver une charge constante.

Le manipulateur, pendant l'intervalle des signaux, laisse passer le courant de la dynamo dans un rhéostat R_1. En donnant aux deux rhéostats R_1 R_2 des valeurs convenables, on fait en sorte que l'intensité moyenne du courant qui traverse la bobine P pendant les signaux soit égale au courant qui traverse le rhéostat R_1 pendant les intervalles de ces signaux.

Des lampes à incandescence L protègent l'isolement de la dynamo. On peut employer également des soupapes électrolytiques.

Emplois de transformateurs pour courant alternatif. — Le même montage, simplifié par la suppression de l'interrupteur à mercure et du condensateur de primaire, peut être employé avec courant alternatif (fig. 102). Les rhéostats sont généralement remplacés par des bobines de self réglables $F_1 F_2$.

L'alternateur conserve toujours la même charge, sauf pendant les intervalles de temps qui séparent les moments où le manipulateur est au contact de *a* et de *b*. Ces intervalles de temps sont d'ailleurs très courts.

On peut également employer le montage indiqué par la figure 103; au repos, le manipulateur M court-circuite le primaire P du transformateur, le court-circuit étant rompu quand on appuie sur le levier.

Un autre procédé consiste à intercaler au repos les deux bobines de self F_1F_2 dans le circuit primaire. La manipulation est faite alors en court-circuitant l'une de ces bobines, dont la self a été choisie suffisamment faible pour que l'étincelle ne jaillisse pas, mais soit tout près de jaillir. La machine n'a ainsi qu'une faible différence de charge dans les deux cas.

Pour éviter les fortes étincelles de rupture qui se pro-

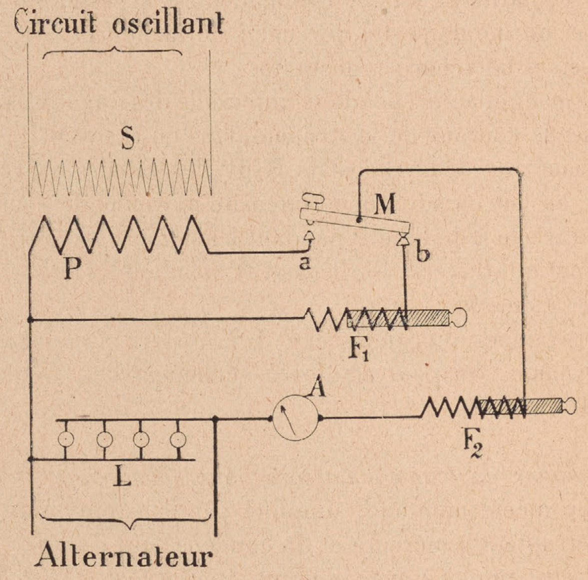


Fig. 102.

duisent au manipulateur, on fait souvent usage de manipulateurs à électro, dont nous parlerons plus loin, permettant de ne couper le circuit qu'au moment où l'intensité du courant passe sur la phase o.

Le rôle de la self F_2, dans tous les montages que l'on vient de voir, n'est pas seulement de régler l'intensité du courant qui traverse le primaire P du transformateur pendant la production des signaux. Elle sert aussi à obtenir

un accouplement faible entre le générateur et le transformateur. On sait que la propriété des accouplements faibles est de ne faire passer que lentement l'énergie d'un circuit dans l'autre. Quand la self F_2 est nulle ou très faible, on observe que l'éclateur qui fait partie du circuit oscillant mis aux bornes du secondaire du transformateur donne autant d'étincelles que d'alternances, soit 100 par seconde si le courant est à cinquante périodes. Si, au

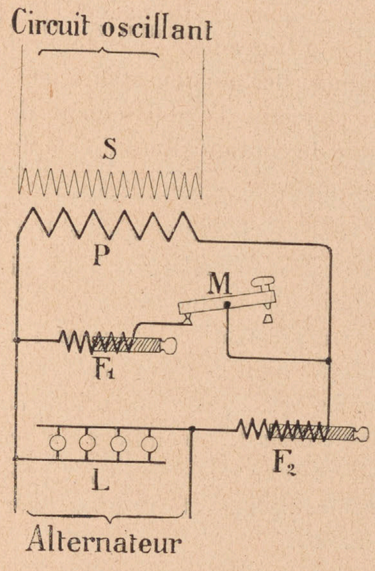


Fig. 103.

contraire, la self a une valeur appréciable, l'accouplement est faible et on constate une réduction dans le nombre d'étincelles par rapport au nombre d'alternances. On peut ainsi réduire à volonté le nombre d'étincelles par seconde ; le nombre de vingt à trente paraît très suffisant.

L'explication de ce phénomène n'a pas encore été donnée nettement ; il y a tout lieu de croire qu'il s'agit là de propriétés magnétiques des noyaux du transformateur.

Le phénomène est d'autant plus net que l'on a établi

la résonance entre la période du courant alternatif employé, d'une part, et les self-inductions du transformateur et la capacité du circuit oscillant d'autre part. Seibt a donné une théorie complète des transformateurs à résonance [1], de laquelle il conclut que le meilleur accouplement est, dans tous les cas, voisin de 0,5.

Cette propriété permet d'économiser l'énergie; en ne produisant qu'un nombre limité d'étincelles, l'énergie primaire est diminuée dans le rapport de ce nombre d'étincelles au nombre d'alternances. De plus, en limitant le nombre d'étincelles, on évite l'échauffement rapide de l'éclateur, des condensateurs, etc.

En ce qui concerne l'établissement de la résonance pour la période du courant alternatif employé, M. Blondel a montré que, dans le cas de transformateurs sans fuites magnétiques, tout se passait comme si le transformateur n'existait pas et si l'alternateur débitait directement sur la capacité du circuit excitateur, multipliée par le carré du rapport de transformation du transformateur.

Il est donc facile dans ce cas de calculer les conditions de résonance. La self F_2 peut être intercalée soit dans le primaire, soit dans le secondaire du transformateur.

Si le transformateur a des fuites, le problème devient beaucoup plus complexe et ne peut guère être résolu qu'empiriquement.

Bobines Ruhmkorff. — Tous les modèles de bobines peuvent être employés à peu près indifféremment, à condition qu'elles puissent supporter la mise à la terre de l'un des pôles du secondaire, si l'on emploie le montage à excitation directe. Toutefois, il est nécessaire que le secondaire puisse fournir un débit suffisant pour charger convenablement soit l'antenne, soit les condensateurs. Certains modèles qui donnent, sans antenne ni terre, jus-

1. *Éclairage électrique*, t. 40, p. 172.

qu'à 40 cm d'étincelles, ne donnent plus que 2 ou 3 cm sur antenne de 30 m et terre, et encore beaucoup moins sur condensateurs. D'autres, au contraire, qui ne donnent normalement que 30 cm d'étincelle, en donnent encore 5 ou 6, pour une même consommation au primaire, sur antenne-terre. Ces bobines sont évidemment les meilleures, puisqu'elles chargent à plus haute tension un condensateur de capacité déterminée, et mettent par suite plus d'énergie en jeu.

Le choix de l'interrupteur joue, d'autre part, un rôle considérable, d'abord par la plus ou moins grande régularité de son fonctionnement, ensuite par la fréquence qu'il permet d'obtenir.

Nous n'entrerons pas dans le détail des divers types de bobines et d'interrupteurs employés dans les installations de télégraphie sans fil, nous renverrons pour cela à l'excellent ouvrage de M. Armagnat. Nous nous bornerons à énumérer les principaux types des interrupteurs employés et à décrire sommairement les bobines qui nous ont donné les meilleurs résultats.

Les interrupteurs employés en télégraphie sans fil doivent, autant que possible, être simples et permettre une marche régulière prolongée ; aussi plusieurs types convenant très bien pour un service de laboratoire n'ont-ils pu être employés en télégraphie sans fil. L'interrupteur Wehnelt est dans ce cas. Les modèles les plus usités sont les interrupteurs genre Foucault, les interrupteurs à turbine et enfin les interrupteurs *secs*.

Nous avons été très satisfaits, en particulier, de l'emploi du *rupteur* Carpentier et de l'interrupteur genre Foucault du modèle Rochefort, avec les bobines fournies par les mêmes constructeurs.

La bobine Carpentier (fig. 104) est à secondaire cloisonné et à isolant solide ; l'interrupteur sec et le condensateur réglable du primaire font corps avec la bobine. L'interrupteur est basé sur le principe suivant. Contrai-

rement à ce qui se passe dans les modèles ordinaires d'interrupteurs à marteau, ce n'est pas ce dernier qui coupe ou rétablit lui-même le circuit primaire. Ce rôle est rempli par une lame de cuivre *l* (fig. 105) qui s'appuie au repos, par un plot en platine, sur un butoir *c* également en platine.

Le marteau *p* est constitué par une palette horizontale

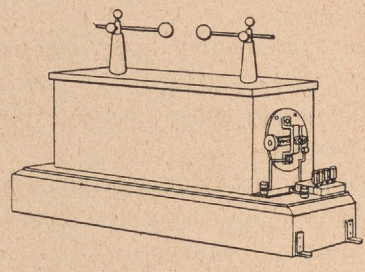


Fig. 104.

mobile autour d'un axe *o*, maintenue contre un butoir en os *b*, au moyen d'un long ressort à boudin *r* réglable, par un écrou E. La tension de ce ressort permet de régler à volonté la fréquence. L'interruption du courant se fait

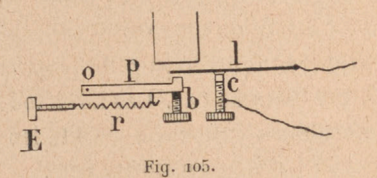


Fig. 105.

au moment où la palette vient heurter la lame flexible *l*; elle a donc lieu brusquement, la palette ayant déjà acquis à ce moment une certaine vitesse. Les réglages à faire sont les suivants : réglage du butoir *b* de la palette, réglage du contact platiné *c* et réglage du ressort *r*; tous se font très facilement et sont très constants.

Ce système d'interrupteur, n'ayant sensiblement pas

de fréquence propre, permet d'actionner la bobine avec du courant alternatif. Il peut être employé avec des bobines de 25, 30 et 35 cm d'étincelles.

La bobine Rochefort, dite *transformateur unipolaire* (fig. 106), comporte un primaire à grande self et un secondaire très court à gros fil, enroulé en une ou deux galettes seulement, n'occupant au milieu qu'une faible partie de la longueur du noyau. Le fil est enroulé de telle sorte qu'une des extrémités, la plus voisine du noyau,

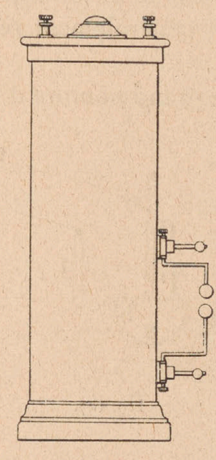


Fig. 106.

est à une tension très faible, l'autre extrémité étant au contraire à très haute tension. La bobine est plongée dans un isolant pâteux. L'extrémité à basse tension est mise à la terre, l'autre à l'antenne, quand on emploie le montage à excitation directe. Cette bobine, du type de 50 cm d'étincelle, nécessite un interrupteur à mercure. Son fonctionnement est très bon.

On emploie souvent, quel que soit le type de bobine, les *interrupteurs à turbine* dont le principe est le suivant : un petit réservoir en forme de toupie P (fig. 107) plonge par sa partie inférieure dans un bain de mercure M et

est mobile autour d'un axe vertical O. Ce réservoir étant animé d'un mouvement de rotation rapide, le mercure, pénétrant à l'intérieur par une petite ouverture *a*, est projeté à l'extérieur par une autre ouverture *b* en vertu de la force centrifuge. Le filet de mercure ainsi projeté tourne autour de l'axe O, en même temps que la toupie, et vient rencontrer une ou plusieurs lames métalliques L. Il interrompt et rétablit donc le courant du circuit relié aux fils F_1 et F_2. La durée de fermeture du circuit dépend de la vitesse de rotation et de la largeur des lames L. Le bain de mercure est généralement recouvert de pétrole ou d'alcool.

Il existe un assez grand nombre d'interrupteurs à tur-

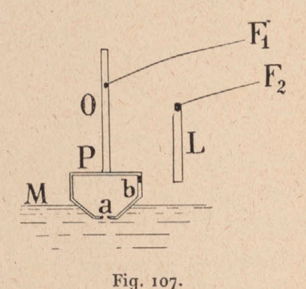


Fig. 107.

bine. Le modèle Gaiffe est particulièrement simple ; le moteur destiné à entraîner l'axe vertical est constitué de la manière suivante : une sorte de roue dentée en fer est placée à la partie supérieure de l'axe. En face de ces dents sont disposés, sur une circonférence, quatre électro-aimants à très faible résistance, montés en série avec l'interrupteur. On lance la roue dentée à la main, et les alternatives de rupture et de rétablissement du courant, dans les électro-aimants, produisent des attractions successives des dents de la roue en fer et, par suite, la continuation automatique de son mouvement de rotation.

On peut également placer les électro-aimants dans un

circuit spécial pour éviter la nécessité d'employer un montage analogue à celui de la figure 101, même si l'on fait usage d'accumulateurs.

M. Rochefort a récemment imaginé un interrupteur très ingénieux dans lequel les interruptions se font, cuivre sur cuivre, dans le pétrole, la partie mobile étant mise en mouvement par un électro-aimant.

Transformateurs pour courants alternatifs. — Les transformateurs pour courants alternatifs, employés en télégraphie sans fil, sont de deux espèces : les transformateurs à circuit magnétique fermé et sans fuites magnétiques, analogues aux transformateurs industriels, et les transformateurs avec fuites magnétiques, à circuit magnétique ouvert ou fermé.

Les premiers donnent un accouplement rigide du primaire et du secondaire ; ils se prêtent moins bien, d'après certains auteurs, à l'établissement de résonances. Leur construction ne diffère de celle des transformateurs industriels ordinaires qu'en ce que l'isolement des circuits et de la masse doit être établi pour une tension double ou triple de celle qui résulte du coefficient de transformation. De plus, les poids de cuivre et de fer doivent être fortement majorés. Généralement, ces transformateurs ne sont pas établis pour des tensions supérieures à 25 000 volts. Le primaire est souvent divisé en plusieurs sections que l'on peut mettre à volonté en circuit pour faire varier le coefficient de transformation et rechercher les résonances. Il y a intérêt à employer une tension primaire aussi élevée que possible, mais on ne peut dépasser 250 volts sans danger pour le personnel qui peut toucher accidentellement le manipulateur.

On emploie fréquemment les bobines d'induction ordinaires pour constituer des transformateurs de courant alternatif avec fuites magnétiques. Leur rendement est très bon en télégraphie sans fil, si les circuits primaire et

secondaire sont convenablement établis, d'après la capacité du circuit excitateur de l'antenne.

Le primaire et le secondaire du transformateur peuvent aussi être enroulés sur deux branches distinctes du circuit magnétique fermé ; on réalise ainsi un autre type de transformateur avec accouplement plus lâche, autrement dit avec fuites magnétiques. Le modèle Gaiffe est de ce genre.

Cette dernière espèce de transformateurs est souvent avantageuse, car l'existence de fuites produit une surtension au secondaire. Mais il est encore difficile de se prononcer d'une manière définitive sur le modèle qu'il convient d'employer de préférence, la théorie complète de la résonance sur la période du courant alternatif n'ayant pas encore été faite, et les expériences étant encore insuffisantes.

Il est souvent nécessaire d'employer plusieurs transformateurs ; les primaires peuvent être montés en série ou en parallèle suivant les résonances à établir, mais les secondaires sont toujours montés en parallèle.

Bobines de self. — Les bobines de self que l'on emploie pour le réglage des intensités ou des résonances du courant primaire, dans les transformateurs industriels, consistent le plus souvent en bobines creuses avec noyau mobile en fer feuilleté. On fait quelquefois usage de bobines à noyau fixe et divisées en sections que l'on peut mettre à volonté en circuit.

Il en est de même des selfs variables que l'on place parfois dans le circuit secondaire pour rechercher les résonances.

Manipulateurs. — Étant donnée la forte intensité des courants que doit interrompre et rétablir le manipulateur dans le circuit primaire de la bobine ou du transformateur, il est nécessaire de le munir de contacts larges et

très conducteurs. D'autre part, si la rupture du circuit par le manipulateur se fait au moment où l'interrupteur est au contact, l'étincelle de rupture se produit au manipulateur, et elle est très forte, n'étant plus shuntée par

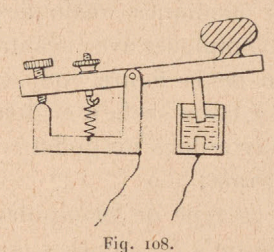


Fig. 108.

le condensateur de la bobine. Pour la diminuer, il est bon de la faire éclater dans le pétrole.

Dans le même but, M. Rochefort met le condensateur de la bobine non plus en dérivation sur l'interrupteur, mais sur l'ensemble du manipulateur et de l'interrupteur.

Nous employons avec succès un manipulateur ayant la forme des manipulateurs ordinaires. Une vis-butoir per-

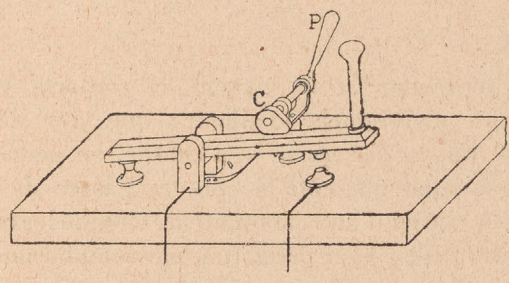


Fig 109.

met de régler la course du levier (fig. 108) et un écrou permet de tendre à volonté le ressort de rappel. Le contact se fait entre deux tiges de cuivre dans un godet contenant du pétrole. Le levier est muni d'une forte poignée en ébonite, pour éviter tout contact accidentel désagréable de la main avec le circuit.

M. Marconi emploie des manipulateurs à contact sec, platine sur platine, protégé parfois par un condensateur spécial logé dans le socle (fig. 109).

Lorsque le manipulateur doit être à double effet, comme dans les montages analogues à celui de la figure 101, on peut employer avec avantage un manipulateur tel que celui de la figure 108, mais dans lequel la vis arrière est à large section et donne aussi un contact cuivre sur cuivre dans un godet rempli de pétrole, comme celui de l'avant.

On peut, avec ce type de manipulateur, couper des intensités allant jusqu'à 50 ampères, sans qu'il soit né-

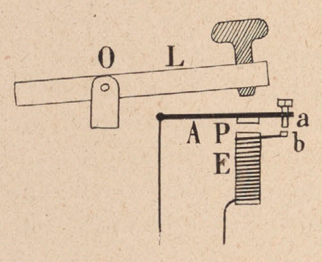


Fig. 110.

cessaire de changer trop souvent les contacts, changements qui n'entraînent d'ailleurs que des dépenses minimes. En cas de service très chargé, on peut monter deux manipulateurs côte à côte et passer de l'un à l'autre, au moyen d'un commutateur, lorsque les contacts de l'un sont usés, pour permettre leur remplacement par un aide.

Quand les intensités à couper deviennent trop fortes, il est nécessaire d'employer un manipulateur à électro-aimant. L'une des dispositions employées est la suivante.

Le levier L du manipulateur (fig. 110) est indépendant du circuit à couper. Celui-ci arrive à une lame flexible A, formant ressort ou munie d'un ressort antagoniste, et garnie d'une palette en fer doux P et d'un contact ré-

glable *a*. En face de cette palette se trouve un électro-aimant E, dont l'enroulement à faible résistance est relié d'une part à l'autre extrémité du circuit et d'autre part à un contact *b* placé en face de *a*. Quand on appuie sur le levier, le circuit est fermé; si l'on abandonne le levier, celui-ci se relève, mais le contact *a* n'abandonne *b*, c'est-à-dire ne coupe le circuit, que quand l'attraction de la palette P par le noyau de E est assez faible pour permettre à la lame A de se relever. On règle ressorts et contacts de manière que la rupture du contact se produise au moment où l'intensité est nulle ou à peu près.

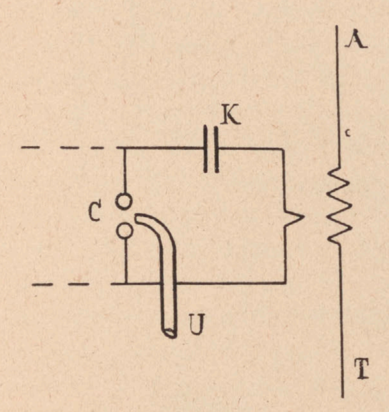


Fig. 111.

On peut aussi opérer cette rupture à la phase o au moyen d'un relais avec pile locale, coupant automatiquement le circuit quand l'intensité est nulle.

On a aussi essayé, dans certains cas, de manipuler en faisant varier l'excitation de la dynamo ou de l'alternateur, mais ce procédé est peu commode.

Il est également possible de ne pas toucher au circuit primaire et de manipuler ou bien sur le circuit oscillant, ou bien sur l'antenne elle-même, soit en la coupant, soit en la désaccordant. Dans le cas où l'on manipule sur le circuit oscillant, on peut court-circuiter la self primaire

du transformateur Tesla ou Oudin, en laissant jaillir l'étincelle en permanence, ou bien écarter et rapprocher les pôles de l'éclateur de manière à couper ou laisser jaillir l'étincelle.

M. Marconi a proposé de laisser débiter en permanence le transformateur sur la capacité et de supprimer

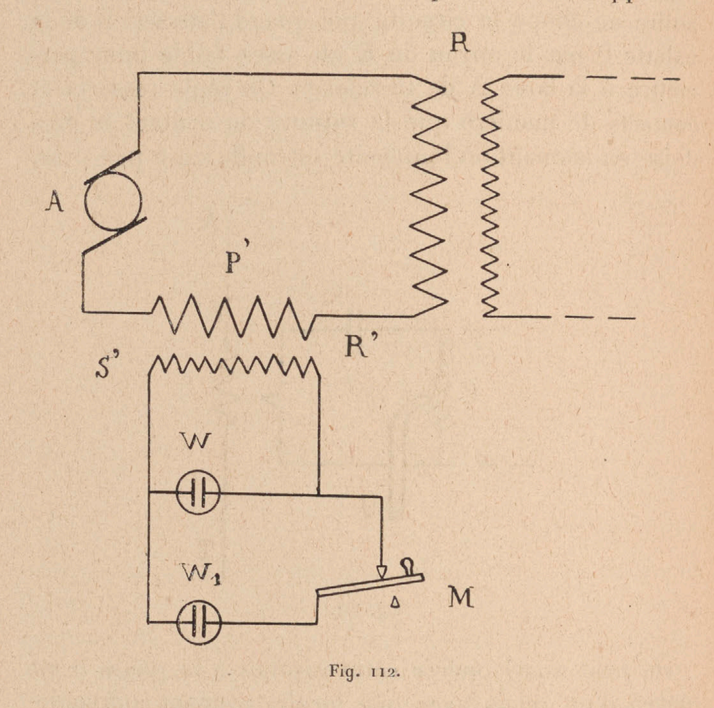


Fig. 112.

les étincelles au moyen d'un violent courant d'air amené par une tuyère U placée en regard de l'oscillateur (fig. 111). La manipulation se fait alors en agissant sur le courant d'air.

Enfin, un autre procédé consiste à intercaler, dans le circuit de l'alternateur, le primaire P′ d'un deuxième transformateur R′ (fig. 112) dont le secondaire S′ est fermé sur des résistances liquides W W_1 et sur la clef M.

Le transformateur R′ fonctionne en sens inverse du

transformateur principal R, c'est-à-dire qu'il abaisse la tension du courant fourni par l'alternateur. Lorsque la clef M est relevée, les deux résistances W et W_1 sont fermées en quantité sur S'. La quantité d'énergie absorbée par R' est alors assez grande pour empêcher le fonctionnement de l'oscillateur. Si, au contraire, on abaisse la clef, la résistance W est seule intercalée sur S' et, l'énergie absorbée par R' diminuant, les étincelles peuvent se produire.

Oscillateurs ou éclateurs. — Dans le cas où l'on emploie de faibles énergies, tous les modèles d'oscillateurs employés pour l'étude des ondes hertziennes dans les laboratoires peuvent être employés en télégraphie sans fil. Toutefois, l'expérience a montré qu'il était plus commode de se servir du simple oscillateur de Hertz, constitué par deux sphères, dans l'air, reliées aux deux pôles de la bobine d'induction. L'emploi d'oscillateurs plongés dans des diélectriques liquides, comme l'oscillateur Righi, présente l'inconvénient suivant : au bout d'une certaine durée de fonctionnement, le diélectrique, pétrole par exemple, est partiellement décomposé, de petites parcelles de carbone sont mises en liberté et le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique diminue.

Lorsque l'étincelle que l'on emploie dépasse 5 ou 6 cm, il y a avantage à la fractionner en plusieurs parties, en employant un oscillateur à 3 ou 4 boules. Nous avons, en particulier, fait usage, dans certains cas, d'oscillateurs Blondel à 4 boules plongées dans le pétrole, celui-ci étant constamment renouvelé par une sorte de siphon.

La nature du métal qui constitue les boules de l'oscillateur n'a qu'une importance secondaire ; si l'on emploie du cuivre, la couche d'oxyde noir dont elles se recouvrent rapidement ne gêne nullement le fonctionnement. Cependant, on a reconnu que le métal le plus avantageux était le zinc.

Lorsque l'oscillateur est placé directement entre l'antenne et la terre, l'expérience a montré qu'il était préférable de connecter l'antenne au pôle négatif du secondaire de la bobine. Il est souvent commode d'employer, pour être assuré du sens de cette connexion, un oscillateur formé d'un plateau de 6 ou 8 cm et d'une tige arrondie à son extrémité ; l'antenne étant reliée au plateau et la terre à la tige, l'étincelle obtenue doit être absolument rectiligne, très blanche et claquante, et aller de l'extrémité de la tige au centre du plateau.

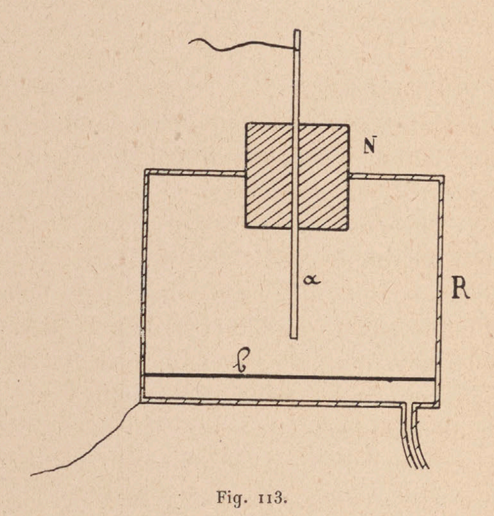


Fig. 113.

Quant aux oscillateurs genre Hewitt et de Valbreuze, constitués par des lampes à mercure, il semble que leur usage n'ait pas donné de résultats excellents, en raison des variations du degré de vide dans la lampe à mercure et de son échauffement.

Nous avons parlé plus haut (p. 157) de l'oscillateur formé par l'arc chantant de Duddell, dans le procédé Poulsen.

L'oscillateur Fessenden est formé d'une pointe *a* (fig. 113) qui pénètre dans une boîte métallique R à tra-

vers un bouchon isolant N, et d'un plateau métallique *b* en communication avec la boîte. Celle-ci est remplie d'air comprimé au moyen d'un tuyau O.

Cette disposition aurait, sur l'oscillateur ordinaire, l'avantage de permettre l'emploi d'étincelles plus longues, sans qu'elles cessent d'être oscillantes.

L'expérience a montré que les oscillateurs en vase clos, que l'on emploie souvent aussi pour éviter le bruit violent des étincelles, ne donnent en général que de mauvais résultats. Il se forme de l'ozone et des vapeurs nitreuses qui diminuent le pouvoir diélectrique de l'air et abaissent par conséquent la tension correspondant à l'écart des pôles de l'éclateur à l'air libre. On a cherché à obvier à cet inconvénient en installant un ventilateur dans le vase clos, mais cela entraîne une complication souvent hors de proportion avec le résultat obtenu.

Dans les stations puissantes, pour éviter un échauffement trop rapide des pôles de l'éclateur, on constitue celui-ci soit au moyen de gros cylindres métalliques, soit au moyen de tores parallèles. L'étincelle peut alors se déplacer dans l'intervalle qui sépare les deux pôles, et l'on répartit ainsi l'échauffement sur une plus grosse masse, avec une grande surface de refroidissement. On peut compléter cette disposition en projetant un jet d'air comprimé ou d'acide carbonique provenant d'acide carbonique liquide. On peut aussi faire tourner les cylindres sur eux-mêmes au moyen d'un mouvement d'horlogerie.

Dans tous les cas, il faut considérer que l'éclateur joue un rôle très important, et il importe de l'établir avec le plus grand soin.

Condensateurs. — Les condensateurs nécessaires pour les circuits oscillants à haute tension sont le plus souvent constitués par des bouteilles de Leyde de formes variées. Si l'énergie mise en jeu est faible, les bouteilles ordinaires peuvent convenir, en ayant soin de les monter

en cascade, de manière que l'épaisseur totale de diélectrique soit suffisante pour éviter toute chance de rupture ou d'échauffement.

Quand les capacités nécessaires deviennent considérables, on donne aux bouteilles une forme très allongée. La compagnie Telefunken construit des condensateurs de ce genre, ayant 1,50 m de hauteur.

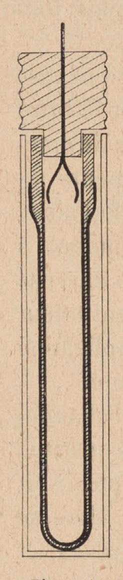
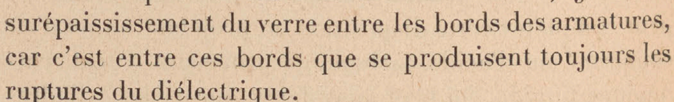


Fig. 114.

Le modèle Mosicki (fig. 114) paraît très avantageux. Il se compose d'un large tube de verre, ayant une longueur de 60 cm à 1,50 m, fermé à l'une de ses extrémités, et dont l'épaisseur est largement augmentée du côté de l'ouverture. Les deux faces sont argentées et recouvertes d'un dépôt de cuivre électrolytique. Le contact avec l'armature intérieure est pris au moyen d'une pièce de cuivre fixée dans un bouchon de porcelaine; l'armature extérieure est protégée par un tube de cuivre qui la recouvre et qui est en contact avec elle. Le tout est rempli d'eau glycérinée. Un tel condensateur peut résister à de fortes tensions, bien que les tubes soient très minces, grâce au



surépaississement du verre entre les bords des armatures, car c'est entre ces bords que se produisent toujours les ruptures du diélectrique.

Nous employons aussi avec succès des condensateurs formés de lames d'aluminium séparées par d'épaisses lames de verre, le tout étant plongé dans des bacs pleins de pétrole. Ce modèle est construit par la maison Gaiffe.

Transformateurs genre Tesla. — L'emploi de transformateurs genre Tesla, c'est-à-dire à circuits primaire et secondaire distincts, nécessite un fort isolement entre les deux circuits. On les constitue souvent au moyen de câble recouvert d'une très forte couche de caoutchouc et en-

roulé sur des noyaux de bois paraffiné ou d'ébonite. Les deux circuits, formés d'une seule couche de spires, sont superposés. Pour diminuer les difficultés d'isolement, on peut réunir entre elles les extrémités inférieures de chacun des circuits.

Quand on se contente d'accouplements lâches, les deux circuits peuvent être formés par de larges tuyaux de cuivre argenté ou étamé, roulés en forme de serpentin. Les deux solénoïdes ainsi constitués sont placés à l'intérieur l'un de l'autre, à une distance de plusieurs centimètres. On peut faire varier la longueur de chacun des circuits au moyen de mâchoires mobiles pouvant embrasser les tuyaux en un point quelconque de leur longueur.

Transformateurs genre Oudin. — Les transformateurs genre Oudin sont généralement constitués avec des

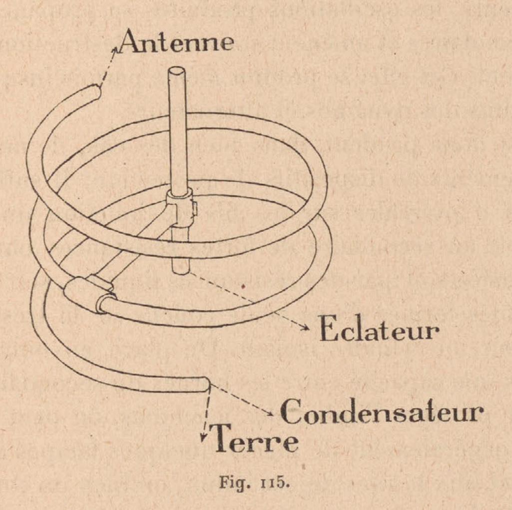


Fig. 115.

tuyaux de cuivre plus ou moins larges, étamés ou argentés, roulés en spires de 30 à 50 cm de diamètre. Le nombre des spires est généralement inférieur à 6. La totalité des spires est le plus souvent intercalée en permanence

dans l'antenne. Il suffit donc d'une mâchoire mobile pour faire varier à volonté la longueur des spires intercalée dans le circuit d'excitation. On obtient facilement ce résultat en plaçant au centre du solénoïde une colonne en cuivre munie d'une douille mobile, portant elle-même une lame flexible qui se termine par une mâchoire. Celle-ci vient embrasser le tuyau et peut être serrée sur lui au point choisi (fig. 115).

Pour les stations puissantes, on peut constituer les spires par plusieurs tuyaux en parallèle.

Pour les petites puissances, les spires peuvent être constituées au contraire par des fils de cuivre simples ou multiples en parallèle.

Protecteurs de bobines. — Les circuits oscillants étant montés aux bornes des secondaires de bobines ou transformateurs, les oscillations produites se propagent dans ces secondaires et amènent souvent la destruction de leur isolement. Cet effet se produit même parfois jusque dans les induits des dynamos et alternateurs.

Il est donc prudent, dans bien des cas, de munir ces enroulements de dispositifs de protection. Il suffit quelquefois d'intercaler sur les fils de jonction du circuit oscillant au secondaire de fortes résistances ohmiques, constituées soit par des résistances liquides, soit par des solénoïdes formés d'une seule couche de fil très fin enroulé sur un cylindre isolant. On place en outre quelquefois une capacité entre les bornes du secondaire.

Pour protéger l'induit des machines, on peut se contenter généralement de placer quelques lampes à incandescence aux bornes de cet induit, ou bien un condensateur, ou bien deux condensateurs en cascade, le point central étant mis à la terre, ou encore des soupapes électrolytiques.

Lorsque les fils de connexion du transformateur aux machines ont une grande longueur, il faut tenir compte

des phénomènes d'induction de l'antenne ou du circuit excitateur sur ces fils. Il devient alors nécessaire de prendre de sérieuses précautions pour protéger les isolements. Le moyen qui paraît le meilleur est celui des deux condensateurs en cascade avec point central à la terre.

CHAPITRE VIII

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES DÉTECTEURS D'ONDES ET DES MONTAGES DES APPAREILS DE RÉCEPTION

Nous avons indiqué dans le chapitre VI les procédés employés pour faire agir, avec le maximum de rendement, les oscillations électriques engendrées dans l'antenne de réception, sur les appareils destinés à traduire ces oscillations en signes perceptibles à nos sens, et que l'on nomme *détecteurs d'ondes*. Il nous reste à exposer en détail comment sont constitués les divers détecteurs dont on fait usage en télégraphie sans fil et comment sont montés les circuits d'utilisation des propriétés de ces détecteurs.

Détecteurs. — Les détecteurs peuvent être classés en deux catégories : les détecteurs sensibles à la tension des oscillations et les détecteurs sensibles à l'intensité.

Dans chacune de ces catégories, il convient encore de distinguer les détecteurs qui sont sensibles à la tension ou à l'intensité maximum et ceux qui sont sensibles à la tension ou à l'intensité efficace des oscillations.

Les principaux détecteurs sont les suivants :

Tension	maximum : cohéreur.
	efficace : détecteur électrolytique, détecteurs à gaz ionisé.
Intensité	maximum : détecteur magnétique.
	efficace : bolomètre, thermogalvanomètre.

Cohéreurs

Historique. — Bien que quelques physiciens, tels que Varley et Calzecchi-Onesti, aient pressenti certaines propriétés électriques des limailles métalliques, c'est à M. Branly que revient incontestablement l'honneur d'avoir mis en lumière, en 1890, l'influence des ondes hertziennes, à distance, sur la conductibilité des limailles métalliques. L'idée d'appliquer ces propriétés à l'étude des perturbations électriques de l'atmosphère et à la réception de signaux hertziens à petite distance est due à MM. Lodge et Popoff. Enfin, c'est M. Marconi qui parvint le premier à les appliquer à la réception de signaux télégraphiques à grande distance.

L'étude détaillée des divers phénomènes présentés par les contacts imparfaits de corps conducteurs, et en particulier de limailles métalliques, est due principalement à MM. Branly, Blondel, Tommasina, Bose, etc. Cette étude a conduit à établir une classification de ces phénomènes.

Principe et classification. — Lorsqu'on rapproche deux corps conducteurs intercalés dans un circuit électrique contenant une certaine force électromotrice et un instrument de mesure, on constate qu'il existe une ou plusieurs positions des corps conducteurs, intermédiaires entre le contact absolu et l'isolement. Cela revient à dire que le contact peut être imparfait et présenter une résistance qui n'est ni nulle ni infinie. Si l'on soumet un contact imparfait à une perturbation électrique quelconque, ondes hertziennes, augmentation de la force électromotrice du circuit, etc., il peut se produire quatre phénomènes différents :

1° La résistance du contact diminue et conserve sa nouvelle valeur ; toutefois, un choc, une élévation de température, la ramènent à sa valeur primitive. Les corps

conducteurs dont le contact jouit de cette propriété sont les *cohéreurs ordinaires*, appelés *radioconducteurs* par M. Branly ;

2° La résistance du contact diminue, mais reprend sa valeur primitive dès que celui-ci est soustrait à l'action de la perturbation électrique. L'instrument est appelé dans ce cas *cohéreur autodécohérent ;*

3° La résistance du contact augmente et conserve sa nouvelle valeur ; mais elle reprend sa valeur primitive sous l'action d'un choc ou d'une élévation de température : on a alors affaire aux *anticohéreurs ;*

4° La résistance du contact augmente, mais reprend sa valeur primitive dès que l'instrument n'est plus soumis à l'effet de la perturbation électrique : c'est un *anticohéreur autodécohérent.*

Cohéreurs ordinaires. Expérience fondamentale de M. Branly. — Les contacts présentant le phénomène de la cohérence ordinaire sont ceux que l'on rencontre le plus fréquemment. Ce sont les premiers étudiés par M. Branly. Il paraît intéressant d'indiquer quelle fut l'expérience fondamentale de ce physicien [1].

« Si l'on forme un circuit comprenant un élément Daniell, un galvanomètre à long fil et un tube à limaille (formé d'un tube en verre ou en ébonite contenant une certaine quantité de limaille métallique comprise entre deux cylindres métalliques), il ne passe le plus souvent qu'un courant insignifiant ; mais il y a une brusque diminution de résistance, accusée par une forte déviation du galvanomètre, quand on vient à produire, dans le voisinage du circuit, une ou plusieurs décharges électriques. L'action peut être constatée à plus de 20 m, à travers des cloisons et des murs. Les variations de résistance sont considérables ; elles sont, par exemple, de plusieurs mil-

---

1. Branly, *Congrès international de physique de 1900.*

lions d'ohms à 2 000 ou même à 100, etc. La diminution n'est pas passagère. »

M. Branly répéta cette expérience avec toutes sortes de corps conducteurs et dans des conditions variées ; il constata qu'elle pouvait être réalisée, avec plus ou moins de facilité, en employant toutes les limailles et grenailles métalliques, des métaux réduits et porphyrisés, des mélanges de poudres métalliques et de poudres isolantes, des poudres de quelques oxydes et sulfures métalliques, des plaques d'ébonite métallisées, des crayons solides formés de poudres métalliques agglomérées par la fusion d'une substance isolante, etc., etc.

Les mêmes résultats furent obtenus avec des colonnes de billes ou de disques métalliques, ayant plusieurs centimètres de diamètre, et avec deux corps conducteurs de forme quelconque posés l'un sur l'autre.

En exerçant sur la limaille, les grenailles ou les billes une pression à l'aide de poids graduellement croissants, on arrive souvent assez vite au point où l'influence électrique peut s'exercer.

Si l'on intercale un tube à limaille dans un circuit contenant une grande force électromotrice, l'effet produit est le même que celui des ondes hertziennes. En particulier, si l'on règle la pression de la limaille de telle façon que sa résistance soit très considérable et que le galvanomètre soit à peine dévié, et si l'on fait passer dans ce tube, après l'avoir retiré de son circuit, le courant d'une pile de 25 volts, la résistance du tube diminue. On constate le fait en replaçant le tube dans son circuit initial et en mesurant la déviation du galvanomètre. On recommence avec une pile de 50, puis de 100 volts, et on constate, après chaque opération, une augmentation de la déviation, dès que le tube est replacé dans son circuit. Pour bien montrer qu'il s'agit d'une poussée due à la force électromotrice, on a eu soin d'intercaler, dans le circuit de la pile de haute tension, une résistance liquide

de plusieurs millions d'ohms, qui ne permet pas à l'intensité de devenir appréciable alors que la limaille est devenue conductrice. Si l'on fait alors éclater à une distance convenable une étincelle, on constate que son effet est le même que celui d'une pile de 200, 300, 400 volts. L'effet de l'étincelle est progressif à mesure que la distance diminue.

Cette expérience paraît nécessiter plus de commentaires que n'en fait son auteur.

Les 25, 50, 100 volts de la pile à l'influence de laquelle on soumet le cohéreur ne sont pas la différence de potentiel existant entre les deux électrodes de cet instrument. Ce dernier a été, en effet, rendu légèrement conducteur avant d'être soumis à la première action de la pile de 25 volts ; si donc on l'intercale dans le circuit de cette pile, comme il est impossible de réunir, avec une simultanéité absolue, les deux électrodes du cohéreur aux pôles correspondants de la pile, la différence de potentiel de 25 volts n'existe à aucun moment entre ces deux électrodes. La différence de potentiel réelle entre ces deux points est égale au produit des 25 volts par le rapport de la résistance du cohéreur à la résistance totale du circuit. Celle-ci étant très grande, puisqu'on a intercalé plusieurs millions d'ohms, la différence de potentiel réelle est très faible.

On s'explique alors aisément que l'action d'une étincelle à distance soit équivalente à celle d'une pile de plusieurs centaines de volts agissant dans les conditions indiquées. Encore faudrait-il, pour interpréter exactement ces résultats, savoir quelle était la résistance initiale du cohéreur, celle du circuit de la pile, et connaître si le transfert du cohéreur, de ce circuit au circuit du galvanomètre, était fait rapidement, ceci pour juger de l'influence de la charge électrostatique prise par le cohéreur.

Si l'on répète cette expérience avec un cohéreur présentant au repos une résistance très grande et qu'on

l'intercale dans un circuit n'ayant qu'une faible résistance par rapport à celle du cohéreur, on constate qu'il suffit d'une pile de 2 à 5 volts pour l'amener immédiatement à son maximum de conductibilité. Il est même possible de construire des cohéreurs qui ne supportent pas plus d'un dixième de volt sans devenir aussitôt conducteurs.

D'autre part, le fait que l'influence de l'étincelle sur un cohéreur augmente à mesure que sa distance à l'instrument diminue paraît pouvoir être expliqué de la manière suivante : M. Branly a constaté que les limailles étaient, dans certaines limites, d'autant plus sensibles qu'elles étaient soumises à des pressions plus fortes. Il résulte de cela que, dans un même cohéreur, les différentes couches horizontales de limaille ont des sensibilités différentes. Donc, lorsqu'on soumet un cohéreur à une même étincelle produite à des distances variables, une plus ou moins grande quantité de limaille sera actionnée et la résistance diminuera par suite plus ou moins. On constate, en effet, avec des tubes contenant une très petite quantité de limaille, que la conductibilité acquise par l'effet d'une étincelle est à peu près indépendante, dans les limites d'action, de la distance au tube.

En résumé, les diverses expériences faites ont mis en évidence que la sensibilité de l'instrument était fonction de la nature des conducteurs, de l'état des surfaces en contact, du diélectrique interposé, de la pression des conducteurs, etc., enfin, de la différence de potentiel produite normalement entre les corps en contact imparfait par le circuit dans lequel ils sont intercalés. On a reconnu que, pour chaque contact imparfait, il existait une valeur-limite de cette différence de potentiel au-dessus de laquelle le contact n'est plus actionné régulièrement et même ne présente plus de position intermédiaire entre le contact absolu et l'isolement. M. Blondel l'a dénommée *tension critique de cohérence*. Cette tension varie avec la nature des conducteurs en contact,

l'état de leur surface, etc. Ce n'est pas une quantité physique précise à proprement parler, mais une notion empirique utile et répondant aux conditions pratiques d'emploi.

Cohéreurs autodécohérents. — Lorsqu'un ou les deux conducteurs en contact imparfait sont en charbon, on constate que l'instrument reprend sa résistance primitive dès que l'action perturbatrice a cessé. On retrouve également cette propriété avec certains oxydes métalliques et même accidentellement avec des limailles métalliques. Toutefois, on remarque que la résistance offerte au repos par ces contacts est notablement moins grande que pour les cohéreurs ordinaires et, de plus, instable. Il existe généralement plusieurs positions, c'est-à-dire plusieurs valeurs de la résistance du contact, donnant un fonctionnement analogue de l'instrument. La valeur de la tension critique de cohérence n'est jamais bien nette.

On observe aussi fréquemment, dans le voisinage de la limite, des phénomènes de cohérence persistante. Ceux-ci peuvent aussi être produits par des actions électriques perturbatrices énergiques.

Anticohéreurs. — On constate quelquefois le phénomène d'augmentation de résistance sous une action électrique avec effet persistant, dans l'étude du contact de métaux placés dans des conditions spéciales (feuilles très minces d'or ou d'argent collées sur du verre), et pour des contacts de certains sels, mais le phénomène, assez rare, n'est jamais bien net et n'a pas été l'objet d'études approfondies.

Anticohéreurs autodécohérents. — Lorsqu'on remplace, dans un cohéreur des deux premières catégories, le diélectrique par un électrolyte, on obtient un anticohéreur autodécohérent. Le phénomène est très net lorsqu'on

dépose une couche de vapeur d'eau dans l'intervalle très étroit obtenu en divisant en deux parties le tain d'un fragment de miroir, ou quand on remplace l'air par de la glycérine dans un cohéreur à charbon ou un cohéreur à limailles métalliques mêlées de poudres isolantes. Il est irrégulier, avec tendance à la cohérence persistante, pour les cohéreurs à limailles plongées dans la glycérine ou dans l'eau. M. Tommasina a observé qu'avec du potassium plongé dans du pétrole on a un cohéreur autodécohérent si la pression a une certaine valeur, et un anticohéreur autodécohérent, pour une autre valeur plus forte de la pression. On peut admettre que, dans le premier cas, c'est le diélectrique pétrole qui est interposé entre les conducteurs et que, dans le deuxième cas, c'est l'électrolyte potasse qui est seul interposé.

Théories (1). — Un assez grand nombre de théories ont été émises pour expliquer ces différents phénomènes. Pour M. Branly, le fonctionnement des cohéreurs ordinaires est dû à ce que l'isolant interposé entre les conducteurs est rendu conducteur sous l'influence passagère du courant de haut potentiel, lorsque son épaisseur est suffisamment faible. Les oscillations produiraient une action qui équivaudrait à une diminution d'épaisseur du diélectrique, qui pourrait alors devenir conducteur. Comme le fait observer M. Turpain (2), cette explication rend bien compte du fonctionnement des cohéreurs autodécohérents, mais est insuffisante pour expliquer celui des cohéreurs ordinaires. On pourrait, il est vrai, ajouter à cette hypothèse, comme plusieurs l'ont proposé, celle que les ondes électriques produisent une sorte de pola-

1. Nous citerons pour mémoire une théorie très originale de M. Chunder-Bose, d'après laquelle le fonctionnement des cohéreurs de toute espèce serait dû à une déformation moléculaire des corps en contact. Le phénomène serait absolument analogue à l'effet d'une excitation électrique sur un muscle. (*Congrès international de physique de 1900.*)

2. Turpain, *Les Applications des ondes électriques.*

risation du diélectrique qui persiste après que l'action a cessé. Mais alors on ne voit pas pourquoi le même fait ne se produirait pas avec les cohéreurs autodécohérents. De plus, quelle serait aussi la cause des chaînes de limaille constatées en particulier par M. Tommasina ? Enfin, elle est impuissante pour les anticohéreurs.

L'hypothèse de M. Lodge, prévue d'ailleurs auparavant par M. Branly, rend au contraire bien compte de ce dernier phénomène : sous l'action d'ondes électriques, il jaillit entre les conducteurs en contact imparfait de petites étincelles qui entraînent un peu de matière, produisent une petite soudure et assurent ainsi le contact. Un choc aura donc pour effet de rompre ces soudures et de ramener les contacts dans leur situation primitive. Cette explication rend parfaitement compte du fonctionnement des cohéreurs ordinaires, et elle est confirmée par l'observation des chaînes formées dans les cohéreurs à limailles. Elle peut aussi rendre compte de ce qui se passe dans les cohéreurs à diélectrique solide et dans certains cohéreurs autodécohérents. Dans ce dernier cas, il suffirait d'admettre que les ponts conducteurs formés par la matière sont détruits instantanément, en raison de la nature même des corps conducteurs, charbon, eau acidulée, par exemple. Mais, dans le cas de corps métalliques tels qu'un fragment de mousse de platine compris entre deux électrodes métalliques, on ne voit pas pourquoi la soudure ne serait pas stable, et pourtant nous sommes arrivés, bien qu'avec une certaine difficulté, à obtenir par ce moyen un cohéreur autodécohérent très sensible. Les instruments de Popoff, fragments d'acier oxydé compris entre électrodes de platine, sont dans le même cas.

M. Righi a fait, en outre, une seconde hypothèse : les grains de limaille sont orientés et amenés au contact, sous l'action des ondes électriques. Plusieurs physiciens ont appuyé cette hypothèse par l'observation de réels mouve-

ments de limaille sous l'action d'ondes extrêmement puissantes. Mais il semble que ce fait soit produit par une action secondaire [1], qui ne se présente pas dans le cas d'ondes de très faible énergie. Nombre d'expérimentateurs ont constaté l'absence absolue de mouvement dans ce dernier cas. Cette hypothèse, qui est d'ailleurs en défaut dans le cas de cohéreurs à billes ou de cohéreurs à diélectrique solide et de cohéreurs autodécohérents, ne rend compte d'aucun phénomène, et elle paraît absolument inutile.

Aucune de ces explications ne permet, de plus, de se rendre compte du fonctionnement des anticohéreurs.

M. Tommasina, auquel on doit de remarquables expériences sur cette question, a fait une étude très complète des différents cohéreurs et anticohéreurs, et arrive aux conclusions suivantes : « La cause du phénomène de cohérence est une différence de potentiel qui produit un minuscule champ électrostatique, lequel donne lieu à tous les effets connus comme conséquences d'un champ oscillant compliqué par l'action d'un courant continu, lequel est modifié à chaque accroissement instantané du potentiel, c'est-à-dire à chaque oscillation. Cette modification est due à une polarisation qui se propage de grain à grain ; s'il y a possibilité de mouvement, les particules s'orientent, s'alignent, adhèrent ; on a dans ce cas les cohéreurs ordinaires. Lorsqu'il y a des particules d'oxyde ou d'autres poudres plus ou moins diélectriques, celles-ci se polarisent également sous l'action des ondes hertziennes et interviennent en formant des ponts ou des chaînons moins conducteurs, ce qui donne lieu à des effets négatifs. Il y a dans ce cas des anticohéreurs auto-

1. Cette action peut être la suivante : lorsque des étincelles nombreuses et puissantes jaillissent entre les grains de limaille, le diélectrique compris entre ceux-ci occupe, pendant la production des étincelles, un volume moindre ; il est donc comprimé et par conséquent peut produire en se détendant un mouvement des limailles.

décohérents. Lorsque la nature même de la substance le permet, les ponts conducteurs sont détruits au fur et à mesure de leur formation et l'on a les cohéreurs autodécohérents. Enfin, si la couche interposée entre les corps en contact imparfait peut subir une action électrolytique, on a encore des anticohéreurs autodécohérents. »

En laissant de côté l'hypothèse, inutile et contredite par certaines expériences, du mouvement des corps en contact imparfait, il semble que toutes les théories exposées plus haut peuvent se concilier de la manière suivante.

Il convient de faire ressortir, tout d'abord, qu'il n'y a pas lieu de faire intervenir directement, dans la théorie, l'action d'ondes hertziennes, car on obtient des effets identiques en faisant varier, par un moyen quelconque, la différence de potentiel aux extrémités du contact imparfait, par exemple en modifiant la force électromotrice de la pile du circuit dans lequel il est intercalé.

Pour simplifier l'exposition, supposons que l'on emploie un contact unique, c'est-à-dire formé de deux conducteurs seulement. Le contact imparfait étant plongé dans un diélectrique, si l'on établit une différence de potentiel déterminée entre les deux corps conducteurs, et qu'on les rapproche peu à peu, le diélectrique sera réduit en couche de plus en plus mince entre les deux surfaces en regard. Le petit condensateur ainsi formé augmentera peu à peu de capacité et l'on conçoit qu'à un moment déterminé, il ait la charge maximum qu'il peut supporter, étant données la différence de potentiel établie entre ses armatures et l'épaisseur du diélectrique. Si l'on augmente, à ce moment, cette différence de potentiel par un moyen quelconque, le condensateur crève et il se produit une soudure entre les deux conducteurs, grâce à un entraînement de matière : c'est le cas des cohéreurs ordinaires. A la vérité, la résistance n'est pas toujours ou

pratiquement infinie ou pratiquement nulle ; elle prend parfois une valeur mesurable, bien que très grande, lorsqu'on rapproche convenablement les conducteurs. On peut admettre que, sous une couche très mince, l'on atteint la limite de cohésion diélectrique de M. Bouty, pour cette épaisseur et la différence de potentiel existante ; avant de livrer passage à l'étincelle, le diélectrique se laisse traverser par un effluve qui est la cause de la conductibilité constatée (1), et l'étincelle ne jaillit que lorsque la différence de potentiel est suffisamment augmentée pour chasser le diélectrique (2) [ce fait a été observé souvent avec des distances explosives notables et de hauts potentiels]. Suivant l'adhérence du diélectrique aux conducteurs, cet effluve peut être plus ou moins renforcé, à mesure que l'on augmente la différence de potentiel, avant de livrer passage à l'étincelle.

Lorsque cette limite est suffisamment étendue, en raison de la nature des corps employés, une augmentation faible de potentiel sera suivie d'une augmentation de l'effluve et, par suite, de la conductibilité du contact avec retour à l'état initial, grâce à l'élasticité du diélectrique, lorsque la différence de potentiel sera ramenée à sa valeur primitive ; c'est le cas des cohéreurs autodécohérents (3).

---

1. M. Villard a vérifié que l'effluve des tubes à vide est conducteur, en plongeant dans cet effluve deux électrodes mises en circuit avec un galvanomètre et une force électromotrice de 1 volt.

2. L'expérience suivante, due à M. Rochefort, donne une nouvelle force à cette théorie : si l'on soumet un cohéreur à électrodes et limaille de fer, à l'action d'ondes hertziennes de faible intensité, il se comporte comme un autodécohérent, c'est-à-dire qu'il reprend sa résistance primitive sans qu'il soit nécessaire de lui donner un choc. Si, au contraire, les ondes sont énergiques, la chute de résistance produite est persistante, et il faut un choc pour ramener cette résistance à sa valeur initiale.

3. La conductibilité du diélectrique, dans ces conditions, paraît être démontrée par l'expérience ci-après, déjà signalée par l'un de nous au Congrès des électriciens de 1900 :

Une rondelle de charbon très dur, parfaitement polie, est fixée sur une petite planchette légère, en même temps qu'une potence en cuivre dont l'ex-

A l'appui de cette manière de voir sur l'influence de l'adhérence du diélectrique avec les conducteurs, nous citerons l'expérience qui consiste à réaliser un cohéreur au moyen d'un fragment de mousse de platine compris entre deux électrodes métalliques : le cohéreur obtenu est autodécohérent, alors qu'on obtient toujours un cohéreur ordinaire avec un fragment de platine fondu. De plus, sauf dans certains cas où le phénomène a un caractère fugace, les cohéreurs autodécohérents sont obtenus au moyen de corps ayant une porosité considérable, le charbon par exemple, c'est-à-dire de corps dont les surfaces pénètrent, en quelque sorte, le diélectrique.

Lorsqu'on remplace le diélectrique par un électrolyte, celui-ci est plus ou moins décomposé suivant la différence de potentiel existante ; les gaz mis en liberté augmentent la résistance et l'on a, dans ce cas, des anticohéreurs. Avec tous les électrolytes liquides, on observe l'autodé-

---

trémité, filetée, livre passage à une vis micrométrique ; sur la tête de cette vis est fixée horizontalement une longue tige métallique, et sa partie inférieure est munie d'un fragment de métal inoxydable, argent ou or. On intercale la potence et la rondelle dans un circuit comprenant un élément de pile, un milliampèremètre et une petite bobine d'induction de poste microphonique. Le secondaire de celle-ci est fermé sur un écouteur téléphonique ordinaire, posé sur la même table et à petite distance de la planchette ci-dessus. En rapprochant, au moyen de légers coups donnés sur la tige horizontale, le fragment d'or de la rondelle de charbon, on constate qu'à un moment donné le téléphone rend un son musical très fort et très net qui persiste pendant longtemps sans que l'on touche à aucune partie du dispositif. Le son varie parfois de hauteur et d'intensité suivant la position du téléphone sur la table et la nature du métal constituant le contact imparfait. Mais le son ne se produit pas lorsque le téléphone n'est pas posé sur la table. Il est donc dû à la transmission des vibrations du téléphone au contact imparfait. Nous avons intercalé dans le circuit un oscillographe Blondel et constaté que l'intensité du courant n'était jamais nulle et que la courbe inscrite était une sinusoïde régulière à grande amplitude, mais dont les minimums étaient parfois à une distance très grande de la ligne des o. Quelquefois, ces minimums sont eux-mêmes situés sur une sinusoïde à fréquence beaucoup plus faible, mais parfaitement régulière.

Ce phénomène paraît pouvoir s'expliquer par la variation d'épaisseur du diélectrique interposé, variation causée par les vibrations transmises ; le diélectrique, sous ces faibles épaisseurs, se comporte alors comme un conducteur, grâce à la production permanente d'un effluve entre les deux corps en contact imparfait.

cohérence : les gaz s'échappent aussitôt après leur mise en liberté. Si, au contraire, on opère avec des électrolytes solides, la cohérence négative ou augmentation de résistance persiste, les gaz produits restant adhérents aux conducteurs. Il existe d'ailleurs très peu de corps permettant d'obtenir l'anticohérence persistante. Si l'électrolyte employé est l'eau, celle-ci se comporte tantôt comme diélectrique, tantôt comme électrolyte, et on observe soit des phénomènes de cohérence persistante, soit des phénomènes d'anticohérence autodécohérente.

Tous les faits observés dans l'étude des contacts imparfaits peuvent être expliqués par les considérations que nous venons d'exposer.

Temps de cohérence. — M. Matha a fait observer qu'il fallait tenir compte, dans l'étude de certains phénomènes, du *temps de cohérence,* c'est-à-dire de l'intervalle de temps qui sépare le moment où le cohéreur est soumis à une action extérieure, et celui où il est rendu conducteur.

L'existence de ce *temps de cohérence* permettrait en particulier d'expliquer la différence d'action des oscillations amorties et des oscillations peu amorties. En effet, le cohéreur pouvant être assimilé à un condensateur, qui *crève* lorsque la différence de tension dépasse une certaine valeur, on peut admettre que l'action de la première oscillation d'une décharge est de donner une charge d'un sens déterminé ; il s'écoulera un certain temps, probablement variable et très court, avant que cette charge ait actionné le cohéreur. La deuxième oscillation, de sens contraire à la première, a pour effet de donner une charge inverse de celle qu'avait donnée la première oscillation : l'action de celle-ci peut donc être arrêtée si elle n'a pas encore établi la conductibilité du cohéreur.

Dans le cas d'oscillations très amorties, il y a une grande différence d'énergie entre les deux premières os-

cillations d'une décharge, et l'effet de la deuxième, très inférieur à celui de la première, ne gêne pas sensiblement son action, mais cette différence d'énergie, entre les deux premières oscillations d'une décharge, décroît à mesure que l'amortissement diminue.

Construction de cohéreurs ordinaires pour la télégraphie sans fil. — On a essayé de se servir, pour la télégraphie sans fil, de toutes les espèces de contacts imparfaits. Les essais ont porté sur trois sortes d'instruments : les cohéreurs ordinaires, les autodécohérents au charbon et les anticohéreurs autodécohérents à l'eau. Mais ces deux dernières espèces ont un fonctionnement irrégulier ; de plus, elles ne se prêtent pas à l'emploi d'un relais et par suite à l'inscription des télégrammes. Aussi ces cohéreurs sont-ils beaucoup moins employés que les premiers, bien que leur sensibilité soit parfois très grande, supérieure même à celle de certains cohéreurs ordinaires.

Un grand nombre de types de cohéreurs ordinaires ont été proposés et expérimentés de tous côtés : cohéreurs à limaille, cohéreurs à billes, cohéreurs à contact unique, etc. Ce sont les cohéreurs à limaille qui ont toujours donné les meilleurs résultats.

Les conditions auxquelles doit satisfaire un cohéreur pour la télégraphie sans fil sont la sensibilité et la régularité, c'est-à-dire qu'il doit présenter une chute maximum de résistance pour une augmentation minimum de différence de potentiel, avec un retour régulier et certain à sa résistance primitive, au moindre choc. Ces deux conditions sont difficiles à réunir simultanément. Nous allons examiner les causes qui influent sur chacune d'elles.

La forme de cohéreur le plus généralement employée est celle qu'avait choisie tout d'abord M. Branly (fig. 116). Dans un tube en verre sont ajustées deux électrodes métalliques placées à une distance comprise entre 0,5 mm et 1 mm ; de la limaille métallique fine et régulière est

placée entre ces deux électrodes. Tout d'abord l'expérience montre que la sensibilité de l'instrument ne dépend pas de ses dimensions et très peu de l'écartement des électrodes, dans certaines limites cependant. Ce dernier fait tend à prouver que les contacts utiles sont ceux des limailles avec les électrodes et non des grains de limaille entre eux. En revanche, la sensibilité dépend tout d'abord de la nature des métaux en contact, de leur degré d'oxydation et de la finesse des limailles ; cette finesse ne doit pas cependant dépasser certaines limites, car, avec des poussières, les résultats sont très irréguliers. L'influence de la nature des métaux constituant les limailles et les électrodes est considérable. Il est nécessaire et suffisant,

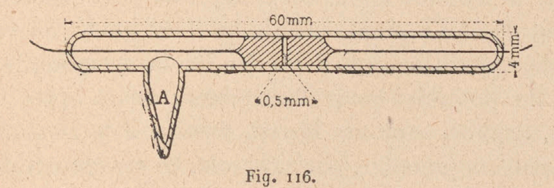


Fig. 116.

pour un usage pratique, que l'un des deux soit légèrement oxydable, sans quoi les tensions critiques seraient trop faibles. On emploie généralement une limaille inoxydable et des électrodes légèrement oxydables. Quand les deux électrodes sont identiques, on a en réalité deux contacts imparfaits en série. Si l'on constitue une des électrodes en métal identique à la limaille, seule l'autre électrode forme contact imparfait avec celle-ci. La tension critique est alors abaissée.

La pression exercée par la limaille sur les électrodes a également une grande importance : si la pression est trop faible, l'instrument est peu sensible ; si elle est trop forte, il est conducteur en permanence. Cette pression peut être réglée, soit par la quantité de limaille, soit par l'effet d'un champ magnétique, lorsque la limaille et les électrodes sont faites de métaux magnétiques (Tissot).

Enfin, la différence de potentiel normalement établie entre les électrodes, par le circuit dans lequel est intercalé l'instrument, influe également sur sa sensibilité, surtout si l'on fait varier en même temps la quantité de limaille (Blondel).

La sensibilité la plus grande est obtenue, pour les différences de potentiel minimum, avec la pression la plus grande que l'on peut donner aux limailles, c'est-à-dire pour la différence de potentiel la plus voisine de la tension critique de cohérence.

La régularité de fonctionnement des cohéreurs dépend des mêmes causes que la sensibilité, mais en sens inverse, en ce qui concerne le retour certain à la résistance primitive par le moindre choc. On conçoit en effet qu'un cohéreur est d'autant plus sensible qu'il est placé, au repos, dans des conditions où il lui faudra la variation la plus faible du potentiel pour l'actionner ; mais après cette action, le choc, toujours brutal, destiné à le ramener au repos peut augmenter, par exemple, le tassement des limailles, de telle sorte que l'appareil est de nouveau rendu conducteur quand celles-ci ont repris l'immobilité. Cependant, une des conditions qui influe sur la sensibilité influe dans le même sens sur la régularité : c'est la différence de potentiel établie normalement entre les bornes des électrodes. En effet, plus cette différence sera faible, moins grande sera la force électromotrice de self-induction $L \frac{di}{dt}$ qui prend naissance dans le circuit, lorsque le choc du marteau rompt le courant, puisque l'intensité de ce dernier sera d'autant plus faible. Cette force électromotrice de self-induction a souvent une valeur suffisante pour dépasser la tension critique du cohéreur et, par suite, pour l'actionner de nouveau et lui faire *traîner* les signaux. Nous verrons plus loin que l'on peut, dans un récepteur de télégraphie sans fil, soustraire le cohéreur à l'influence de cette force électromotrice de self-induction.

Enfin, un cohéreur de télégraphie sans fil doit avoir la plus longue durée possible ; il est nécessaire pour cela qu'il ne contienne pas du tout de vapeur d'eau, qui oxyderait les métaux et diminuerait notablement sa sensibilité. Il est aussi préférable de faire le vide, ou de remplir le cohéreur d'un gaz inerte pour soustraire les métaux à l'action de l'oxygène. Pourtant, l'expérience nous a montré que cette précaution n'est pas indispensable lorsque l'air contenu dans le cohéreur est parfaitement sec. De plus, le cohéreur ne doit pas être traversé par des courants de trop forte intensité, dont l'action est de modifier le degré d'oxydation des métaux. L'emploi de faibles différences de potentiel permet encore de satisfaire à cette condition.

La difficulté d'obtenir des cohéreurs à la fois très sensibles et réguliers a conduit la plupart des expérimentateurs à se contenter de peu de sensibilité. M. Marconi emploie des cohéreurs à limaille de nickel comprise entre électrodes de maillechort (fig. 116). Le vide est fait à l'intérieur de ces instruments, qui sont employés sous 1,5 volt ; mais le récepteur est constitué de telle sorte qu'il ne passe jamais dans l'instrument qu'une très faible intensité, un dixième de milliampère environ. M. Slaby emploie des cohéreurs à vide et à limaille d'argent ou de nickel sous 1,5 volt également. M. Tissot préconise l'emploi des cohéreurs à vide et à limaille de fer comprise entre électrodes de fer ; la pression de la limaille est réglée par un petit aimant, dont les lignes de force sont parallèles à l'axe du tube. Les électrodes sont taillées en biseau.

M. Ducretet construit des cohéreurs démontables, dans lesquels la pression de la limaille peut être réglée par le déplacement de l'une des électrodes.

M. Rochefort emploie, avec le montage décrit page 148, des cohéreurs à trois électrodes, celle du milieu étant constituée par un disque métallique.

M. Blondel a construit des cohéreurs à vide munis d'une poche en verre pleine de limaille. On peut ainsi faire varier à volonté la quantité de limaille comprise entre les électrodes, et la retirer lorsque l'instrument n'est pas employé (fig. 117).

Nous avons légèrement modifié la forme de ce cohé-

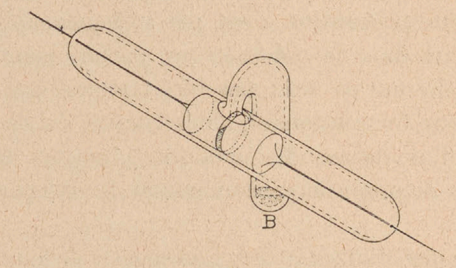


Fig. 117.

reur (fig. 118) en en conservant le principe, de manière à le rendre moins fragile et plus commode à fixer. La réserve de limaille est contenue dans un évidement H pratiqué dans l'une des électrodes, et une encoche *r* ménagée suivant une génératrice permet de faire passer la limaille pour l'introduire dans l'espace utile *l*. Tube, électrodes et limaille sont parfaitement séchés et le tube fermé à la cire; les deux extrémités sont protégées par des douilles métalliques munies de petites bornes *v*, auxquelles viennent s'attacher les fils des électrodes, et permettent d'intercaler facilement l'instrument dans un circuit.

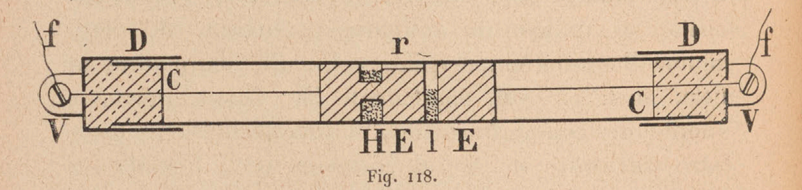


Fig. 118.

Suivant la sensibilité à atteindre, nous employons des limailles d'or ou d'argent alliés de cuivre en proportion variable, d'or ou d'argent vierges, comprises entre électrodes de maillechort ou d'acier. L'or vierge donne les cohéreurs les plus sensibles. Pour augmenter la sensibilité, il y a intérêt à dorer une des électrodes, de manière à n'avoir plus qu'un seul contact imparfait, celui de l'autre électrode.

Ces instruments sont employés sous le voltage de 0,2 volt à 1 volt, suivant leur construction. Un potentiomètre spécial très simple est toujours intercalé dans le circuit et permet de faire varier le voltage aux bornes du cohéreur, de manière à lui donner une valeur aussi voisine que possible de la tension critique de cohérence. On peut donc, en faisant varier la quantité de limaille et le voltage, faire varier la sensibilité du cohéreur. On dispose, par suite, d'un moyen de mesurer approximativement l'énergie à laquelle est soumis le cohéreur, en jugeant de la sensibilité qu'il faut lui donner pour qu'il soit actionné.

Retour des cohéreurs à leur résistance initiale. — On emploie généralement un choc pour ramener les cohéreurs à leur résistance initiale. Ce choc est produit le plus souvent par le marteau d'un trembleur électrique commandé par le relais, comme on le verra tout à l'heure.

M. Tommasina a essayé de remplacer, pour un cohéreur à limaille d'acier, fer, nickel, cobalt, le frappeur par un électro-aimant en dérivation, qui est aimanté dès que le cohéreur est actionné et, par suite, attire aussitôt la limaille et la décohère. Mais nous avons constaté que ce dispositif présente un inconvénient, comme le dispositif Tissot décrit plus haut : la limaille s'aimante au bout d'un certain temps, sa tension critique s'abaisse fortement et il n'est plus possible de la décohérer sous les voltages employés pratiquement.

Plusieurs physiciens ont eu l'idée de provoquer la décohérence du tube en le fixant à la membrane d'un téléphone, actionné soit par le courant du circuit local du cohéreur, soit par un courant commandé par le relais. Les résultats n'ont pas été très bons.

MM. Lodge et Muirhead avaient déjà, dans un brevet accepté le 16 juillet 1898, préconisé l'emploi de cohéreur à décohésion magnétique. Dans leur appareil (fig. 119), la limaille est maintenue entre deux lames métalliques, dont l'une B est recouverte d'une couche de vernis isolant,

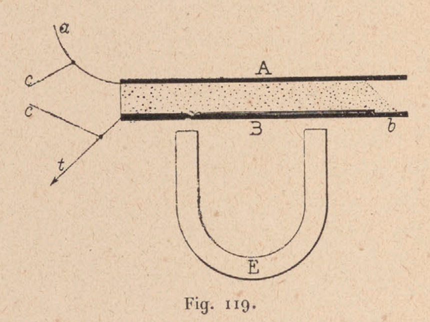


Fig. 119.

sauf sur une bande étroite *b*. Le tout est placé au-dessus et près d'un aimant E.

Quand ces limailles sont cohérées sous l'action d'oscillations, le courant du circuit du relais traverse la lame inférieure, qui est alors attirée par l'aimant. Ce mouvement suffirait à décohérer la limaille.

Les mêmes physiciens ont aussi recommandé l'emploi de cohéreurs à contact unique. Ce type d'appareil (fig. 120) se compose d'une languette *l* en aluminium ou en acier, pincée dans une mâchoire M et sur laquelle s'appuie une pointe d'acier *p*. Une roue dentée R, mue par un mouvement d'horlogerie, fait vibrer la languette et décohère son contact avec la pointe *p*.

M. Branly a récemment présenté un cohéreur à contact unique formé d'un trépied d'aiguilles d'acier, reposant

sur un plan métallique poli. Le contact utile est celui des aiguilles avec le plan. L'instrument est placé sur l'appareil Morse, et les trépidations causées par le mouvement d'horlogerie suffisent à le décohérer.

M. Lodge préconise l'emploi d'un cohéreur constitué de la manière suivante. Le contact imparfait est obtenu au moyen d'un disque mobile en acier et d'une colonne de mercure, le tout plongé dans l'huile. Le mouvement du disque rend inutile l'emploi du tapeur. On aurait ainsi

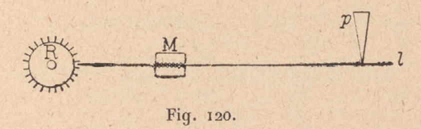


Fig. 120.

un instrument d'une sensibilité et d'une régularité parfaites.

Construction et emploi de cohéreurs autodécohérents pour la télégraphie sans fil. — L'expérience montre que les contacts de ce genre qui donnent les meilleurs résultats pratiques sont ceux qui comprennent au moins un conducteur en charbon, ou alliage de charbon, acier par exemple.

On peut, comme Popoff, disposer, dans un tube recouvert intérieurement de deux bandes de platine très voisines, des grains d'acier produits par le broiement de perles d'acier. Deux éléments de pile peuvent être mis en circuit dans ce cas.

M. Tommasina emploie des grains de charbon compris entre électrodes de maillechort.

M. Ducretet construit des instruments dont le contact imparfait est constitué au moyen d'aiguilles d'acier et de blocs de charbon.

Nous avons obtenu d'excellents résultats, en particulier, avec des grains de charbon très dur compris entre

électrodes de zinc, le tout étant plongé dans le pétrole ou la paraffine. Le zinc peut aussi être remplacé par l'acier ou le fer : on peut alors régler la pression au moyen d'un aimant. La résistance d'un pareil contact doit être de 4000 ou 5000 ohms. Mais tous ces instruments, comme on l'a déjà vu, se dérèglent assez rapidement ; il est nécessaire de les retoucher fréquemment pour qu'ils présentent au repos la conductibilité indispensable à leur fonctionnement. Il est commode de placer un dix-milliampèremètre

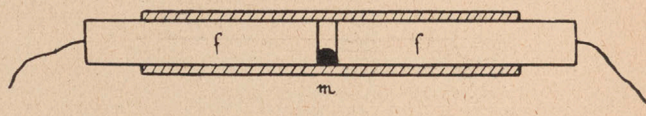


Fig. 121

en circuit avec le cohéreur et le téléphone, pour juger à chaque instant de l'état de la conductibilité du contact. Pour ramener cette dernière à la valeur qui correspond à un bon fonctionnement et qui dépend de la nature des

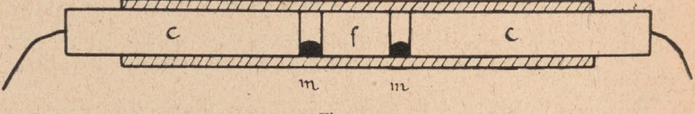


Fig. 122.

corps mis en contact, on peut rendre une des électrodes mobile et régler la pression au moyen d'un aimant ou d'une vis ou simplement par inclinaison du tube.

M. Castelli a obtenu un excellent cohéreur autodécohérent en enfermant dans un tube de verre une goutte de mercure entre deux électrodes de fer *f* (fig. 121). Un second dispositif consiste à placer dans le tube, de part et d'autre d'un petit cylindre de fer *f* (fig. 122), deux gouttes de mercure *m* maintenues par deux cylindres de charbon *c*. Il est avantageux de donner aux gouttes de

mercure un diamètre de 2 mm environ, dans un tube de 3 à 4 mm de diamètre intérieur.

Le cohéreur Michin est constitué par un cylindre de charbon de 1 cm de longueur, dont les extrémités sont appuyées sur deux crochets en aluminium *a* (fig. 123). Les points de suspension constituent le contact imparfait. L'aluminium est suspendu par un fil de platine *l* dans un tube de verre O, fermé à la lampe, contenant un peu de mercure M dans le fond et rempli de vapeurs mercurielles par ébullition. Le circuit est complété par un fil *l'* traversant le verre jusqu'au mercure, et un fil *l''* relié au charbon et plongeant dans le mercure.

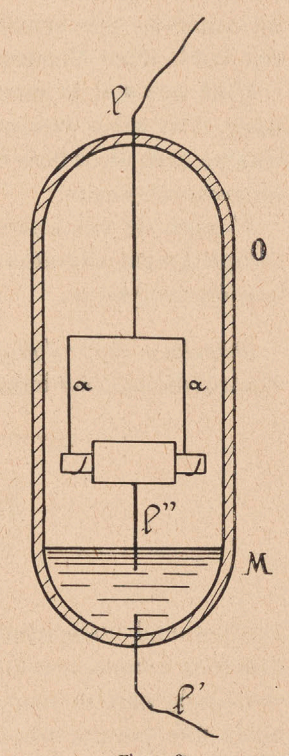


Fig. 123.

Le détecteur le plus régulier de cette espèce semble être celui qu'a imaginé M. Round en 1906 : un fragment de carborandum (alliage de carbone et de silicium) est serré entre deux conducteurs en cuivre, munis d'un dispositif permettant de faire varier la pression. Un pareil contact imparfait peut supporter jusqu'à 6 volts. La tension critique est fonction de la pression. Ce détecteur serait très sensible et très régulier.

Bien que tous les autodécohérents ne puissent être employés isolément à un service pratique, car leur irrégularité nécessite la présence permanente d'un opérateur devant les appareils, ils peuvent être utiles comme appa-

reils complémentaires. Leur sensibilité, lorsqu'ils sont bien réglés, est parfois supérieure à celle de certains bons tubes ordinaires, et, en cas d'avarie du récepteur ordinaire, on peut les employer provisoirement.

Enfin, on peut dans certains cas les remplacer par des microphones très sensibles que l'on met en circuit avec une faible force électromotrice.

Quel que soit le modèle employé, il ne peut être fait usage d'un relais actionnant un appareil Morse ; la réception ne peut alors être faite qu'au son, dans un téléphone ou monotéléphone.

L'usage de ces instruments est d'ailleurs à peu près complètement abandonné depuis l'apparition du détecteur électrolytique.

Détecteur électrolytique. — Le principe du détecteur électrolytique a été indiqué par l'un de nous au Congrès

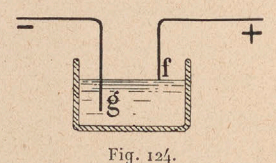


Fig. 124.

international d'électricité en 1900. C'est une sorte de cohéreur à contact unique, dont une des électrodes est constituée par un électrolyte. Il comprend essentiellement une pointe très fine en platine *f* (fig. 124), qui affleure la surface d'un liquide contenu dans un vase V. Dans ce liquide plonge un fil de platine *g*, de section quelconque.

Une première propriété de cet appareil est la suivante. Si on l'intercale dans un circuit parcouru par des courants variables de faible intensité, des oscillations en particulier, on constate qu'il produit un effet de soupape et que seules les alternances positives peuvent franchir le contact imparfait de la pointe avec le liquide. On le

démontre en plaçant aux bornes de l'appareil un instrument de mesure suffisamment sensible ou, mieux, un téléphone. Chaque train d'ondes est traduit par un son dans le téléphone, alors que celui-ci reste muet si l'on supprime du circuit le contact imparfait.

Considérons un circuit (fig. 125) contenant le détecteur D et le téléphone H ; introduisons dans ce circuit une source électrique de force électromotrice *p*, dont le pôle positif est relié au fil *f*. A ce moment, il y a contact entre le fil et le liquide. Le circuit est donc continu et un courant s'établit en traversant l'électrolyte, qui est

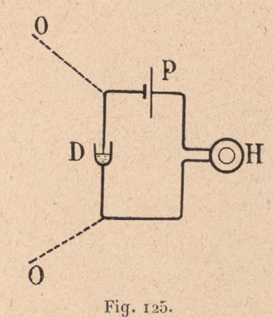


Fig. 125.

d'abord décomposé ; mais si la force électromotrice *p* est inférieure à une certaine limite, la décomposition s'arrête au bout d'un instant et les gaz restent adhérents aux électrodes. On a alors en *f* une force contre-électromotrice qui fait équilibre à *p*. C'est le phénomène de la polarisation.

Si, au contraire, la valeur de *p* est assez grande, la décomposition continue et les gaz se dégagent. Cette limite, au delà de laquelle l'électrolyse devient permanente, constitue une tension critique, analogue à celle qui existe pour les cohéreurs à limaille. C'est seulement lorsque la valeur de *p* est inférieure à la tension critique que l'appareil peut être utilisé comme détecteur d'ondes.

Supposons donc la polarisation établie. L'appareil,

étant au repos, n'est traversé que par le courant très faible résultant de la dépolarisation spontanée, et le téléphone reste muet. Mais si un train d'ondes arrive par le circuit OO, il a pour effet de diminuer la polarisation. La force contre-électromotrice devenant alors inférieure à *p*, il se produira un courant donnant naissance à un son dans le téléphone.

Les détecteurs construits à l'origine (1900) se composaient d'un vase en verre V (fig. 126) posé sur un socle portant une potence métallique AB, dans laquelle était engagée une vis à large tête moletée T. A l'extrémité de cette vis était fixé le fil fin de platine *f*. Un fil plus gros *g*

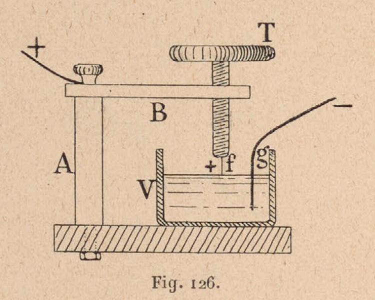


Fig. 126.

plongeait dans le liquide que contenait le vase V. La vis T permettait de régler la sensibilité de l'appareil ; en outre on réglait la valeur de la force électromotrice introduite dans le circuit, à l'aide d'un potentiomètre. Le liquide employé était soit de l'acide sulfurique à 22° environ, soit de l'acide azotique légèrement étendu d'eau.

Cette forme d'appareil avait l'inconvénient de nécessiter des réglages assez fréquents, le niveau du liquide variant par l'évaporation. En outre, les moindres vibrations troublaient le fonctionnement de l'appareil, les mouvements du liquide faisant varier la surface immergée.

On évite ce dernier inconvénient en soudant le fil *f* à l'intérieur d'un tube de verre qu'il ne dépasse que de la quantité qui doit pénétrer dans le liquide. On peut alors

employer des fils n'ayant que 10 à 15 microns, tandis que dans le premier type, la pointe avait encore plusieurs centièmes de millimètre de diamètre. De plus, l'appareil étant hermétiquement clos, on évite l'évaporation.

Le modèle que nous employons est constitué par une ampoule de verre A (fig. 127) contenant de l'acide sulfurique B à 22° ou 25°. Dans cette ampoule sont soudés, d'une part un fil de platine *g* formant la cathode, d'autre part le tube T contenant le fil *f* qui constitue l'anode. Celle-ci se termine par un fil très fin qui vient affleurer

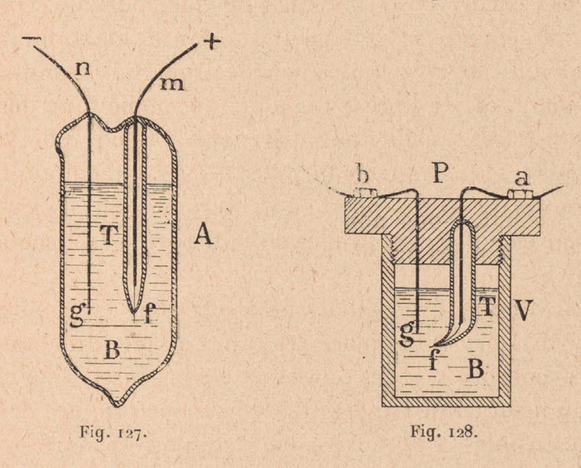


Fig. 127. Fig. 128.

l'extérieur du tube, lequel est lui-même effilé de manière à empêcher les bulles de se former autour de la pointe *f*. L'ampoule est renfermée dans une boîte garnie de coton et munie de deux bornes extérieures.

La disposition adoptée par la compagnie Telefunken est un peu différente. L'ampoule est remplacée par un vase en ébonite V, fermé par un couvercle à vis V également en ébonite, dans lequel sont fixés à l'aide de chatterton le tube T et le fil *g* (fig. 128). Cette forme a l'avantage de permettre le remplacement du tube T lorsque le fonctionnement devient défectueux. Toutefois, ce remplacement ne peut être fait que par le constructeur. En outre,

l'acide sulfurique attaquant l'ébonite, il est nécessaire de remplacer le liquide de temps en temps.

La durée d'un détecteur électrolytique est assez limitée. L'appareil est rapidement mis hors de service lorsque les oscillations sont trop énergiques. Il se produit alors de petites étincelles et la pointe se décolle du verre. De plus il arrive fréquemment que l'acide attaque à la longue l'extrémité du fil *f*.

Détecteurs à gaz. — L'usage des détecteurs à gaz n'est pas encore entré dans la pratique courante. On ne les emploie guère actuellement que dans les laboratoires, comme indicateurs d'ondes pour les appareils de mesure. Cependant, M. de Forest a imaginé récemment un détecteur à gaz, très sensible paraît-il, pour la télégraphie sans fil ; mais les renseignements détaillés sur son emploi font encore défaut. Nous nous contenterons donc d'exposer sommairement les propriétés de cette sorte de détecteurs.

Pour étudier les oscillations électriques assez énergiques, M. Dorn a remplacé les tubes à vide, dits « tubes de Warbourg », par des tubes contenant soit de l'hélium, soit du néon ou de l'argon. Il a ainsi constitué des détecteurs sensibles à la tension efficace, pouvant être avantageusement employés soit dans les laboratoires, soit même dans les stations de télégraphie sans fil pour l'étude des résonances et des ondes stationnaires d'oscillations assez énergiques.

Les tubes à hélium, en particulier, peuvent être construits de quatre manières différentes :

1° Forme du tube de Plücker (tube capillaire avec prolongements élargis), avec deux électrodes. La pression intérieure doit être de 3 à 5 mm ;

2° Même forme, mais avec une seule électrode. Même pression ;

3° Même forme, mais sans électrodes ;

4° Tubes cylindriques de 20 cm de longueur et 11 mm de diamètre avec une seule électrode. Gaz assez raréfié.

Cette dernière forme est la meilleure au point de vue de la sensibilité. La lumière de ces tubes est gris blanchâtre, entre le gris rose et le gris lilas.

M. Dorn a également constitué des tubes à néon, à argon, à oxygène, à acide carbonique : les résultats sont à peu près analogues, bien qu'un peu inférieurs.

M. de Forest a tout d'abord cherché à utiliser les propriétés des flammes pour constituer des détecteurs d'onde. Il plaçait dans la partie brillante d'une flamme de bec Bunsen une petite coupe de platine contenant un sel de potassium ou de sodium ; cette coupe constituait la cathode, tandis que l'anode était formée d'un fil de platine placé à 2 mm au-dessus de la coupe.

Si l'on réunit les deux électrodes par un fil, on constate dans ce fil l'existence d'un courant permanent, qui indique la présence d'une force électromotrice dans le circuit. L'inventeur a reconnu que cette force électromotrice varie sous l'action des oscillations. Si l'on introduit dans le circuit une force électromotrice supplémentaire et un téléphone, comme on le fait pour le détecteur électrolytique, l'appareil peut servir à déceler la présence des ondes. Ici encore la force électromotrice supplémentaire ne doit pas être supérieure à une certaine tension critique.

S'inspirant ensuite des travaux de nombreux physiciens sur l'ionisation produite dans le vide au voisinage d'un filament incandescent, M. de Forest a réalisé une autre forme de détecteur d'ondes, qu'il a appelé l'*audion* et dont le principe est le suivant.

Un filament de carbone recouvert de composés de potassium ou de sodium est placé dans une ampoule vide d'air, comme le filament d'une lampe, et porté au rouge par un courant électrique. L'ampoule contient également

une plaque de platine placée dans le voisinage du filament et munie d'une électrode. Si l'on relie, par un circuit contenant un appareil de mesure, le pôle positif du filament avec la plaque de platine, on constate dans ce circuit l'existence d'un courant assez intense. En ajoutant dans le circuit une pile de 5 à 25 volts dont le pôle positif est relié à la plaque de platine, on obtient un courant à la fois plus régulier et plus intense, qui peut at-

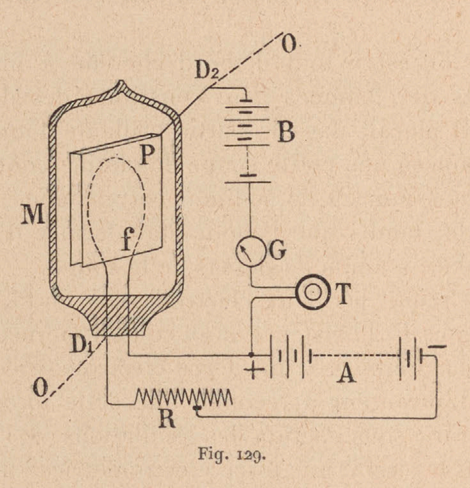


Fig. 129.

teindre jusqu'à 1 à 5 milliampères par centimètre carré de surface du filament.

On observe en même temps la formation d'un faisceau de lumière bleuâtre allant de l'extrémité négative du filament à la plaque de platine. Ce faisceau obéit à l'action d'un aimant et, si l'on intercale un téléphone dans le circuit, chaque mouvement du faisceau lumineux est traduit par un son intense dans le téléphone.

Les oscillations électriques agissant également sur l'appareil, celui-ci peut être employé comme détecteur. A cet effet l'inventeur emploie plusieurs dispositifs.

L'un d'eux consiste à placer de part et d'autre du filament *f* (fig. 129) deux plaques de platine parallèles P

contenues également dans l'ampoule à vide M. Leur distance est d'environ 4 mm. Les forces électromotrices sont disposées comme on l'a dit plus haut. L'appareil est mis en circuit comme un détecteur ordinaire ayant ses bornes en D_1 et D_2.

Dans une autre disposition, l'ampoule renferme seulement le filament de charbon, et la lame de platine est enroulée à l'extérieur. On peut aussi donner à l'ampoule une forme plate et la placer entre deux lames de métal. Enfin les oscillations peuvent être envoyées dans un solénoïde enroulé sur l'ampoule.

Quelle que soit la disposition, la sensibilité de l'appareil est réglée en agissant, d'une part sur le voltage de la pile B, par exemple au moyen d'un potentiomètre, et d'autre part sur l'intensité du courant qui traverse le filament, à l'aide d'un rhéostat R.

D'après l'inventeur, le réglage dépendrait de la fréquence des étincelles qui produisent les oscillations à la transmission, de sorte que l'on disposerait ainsi d'un moyen de sélectionner des signaux transmis par deux stations différentes, avec la même énergie et la même longueur d'onde, mais avec des fréquences d'étincelles différentes.

Lorsque l'appareil permet de faire varier la distance de la plaque de platine au filament (au moyen d'une masse de fer et d'un aimant), on constate que, pour des ondes de longueurs différentes, le maximum de sensibilité correspond à des valeurs différentes de cette distance, qui doit être d'autant plus grande que la longueur d'onde est elle-même plus grande.

Les perturbations électriques naturelles auraient une très faible action sur l'audion, en raison de leur grand amortissement. Enfin, la durée de l'appareil est égale à celle d'une lampe à incandescence ordinaire, et il n'est pas nécessaire de le protéger contre les actions très énergiques, qui ne lui font subir aucune altération.

Tous les renseignements qui précèdent ont été indiqués par l'inventeur dans une communication faite à l'*American Institute of electrical Engineers*, en octobre 1906.

Détecteurs magnétiques. — Le principe des détecteurs magnétiques est basé sur un phénomène signalé par lord Rayleigh et étudié par Rutherford et miss Brooks. Si l'on place une aiguille d'acier aimantée dans une bobine parcourue par des oscillations électriques, cette aiguille subit une désaimantation partielle. Rutherford a reconnu, en dissolvant progressivement l'aiguille dans l'acide azotique, l'existence de deux couches aimantées en sens inverses dans une aiguille soumise à l'action d'oscillations amorties.

M. Tissot a montré que, pour une même énergie mise en jeu pour la production d'oscillations d'amortissements différents, les plus amorties étaient les plus efficaces. On peut donc admettre que l'effet des oscillations sur l'aimantation d'un noyau est en rapport avec l'intensité maximum.

M. Marconi, et après lui un assez grand nombre de physiciens, ont songé à utiliser cette propriété pour constituer un détecteur d'ondes utilisable en télégraphie sans fil. Les dispositifs proposés sont nombreux ; nous décrirons seulement celui auquel M. Marconi s'est arrêté en dernier lieu et qui est employé dans toutes les stations de la compagnie Marconi.

Un noyau magnétique est constitué par une sorte de corde sans fin M (fig. 130), faite de fils de fer fins, isolés à la soie. Cette corde est montée sur deux poulies à gorge *a*, dont l'une est entraînée par un mouvement d'horlogerie avec une vitesse quelconque, de l'ordre de 5 à 10 cm à la seconde. Sur un tube de verre ou d'ébonite, dans lequel passe le noyau mobile, sont enroulés deux circuits. L'un P est formé d'une seule couche de fil ayant au total 3 à 4 m de longueur, et relié au circuit OO

parcouru par les oscillations ; l'autre S est enroulé sur une bobine plate et plus large, placée au milieu du premier enroulement. Le circuit S comprend un grand nombre de spires de fil fin (100 ohms environ) et est fermé sur un téléphone T. Enfin, un aimant A est placé en regard de l'ensemble.

La corde M étant mise en mouvement, si des oscillations parcourent le circuit OO, chaque train d'ondes est traduit par un son dans le téléphone. Lorsque la corde M est immobile, les oscillations sont sans effet appréciable ; toutefois, si on arrête la corde pendant une série continue

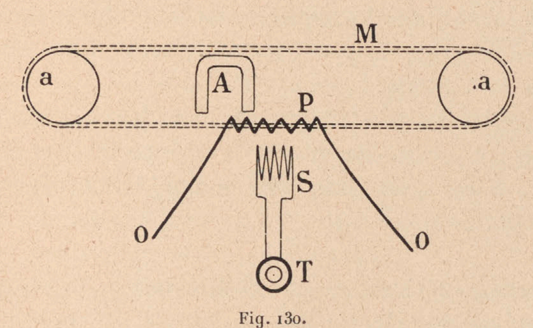


Fig. 130.

de groupes d'oscillations énergiques, on perçoit encore des sons pendant un certain temps après l'arrêt ; mais ce temps est très court et les sons s'éteignent rapidement.

On peut expliquer le fonctionnement de l'appareil de la manière suivante : une tranche quelconque de la corde mobile, s'approchant de l'aimant, a une aimantation constamment variable ; ses molécules magnétiques sont donc continuellement en mouvement et leur inertie est détruite tant que la tranche reste soumise à l'action de l'aimant. Les oscillations électriques qui seraient trop rapides et trop peu énergiques pour agir d'une manière appréciable sur ces molécules, si elles étaient au repos, peuvent alors produire un effet sensible. Nombreux sont les exemples de phénomènes analogues, en mécanique.

Les trains d'ondes se traduisent donc par des variations brusques de l'aimantation du noyau et, par suite, par des sons dans le téléphone.

Il y a intérêt, pour augmenter la sensibilité de l'appareil, à employer deux aimants dont les pôles nord, par exemple, sont tous deux en face du centre de la bobine, les pôles sud étant au voisinage de l'entrée et de la sortie. On règle l'intensité du champ magnétique traversé par le noyau mobile en faisant varier la distance des aimants à la bobine.

La nature du métal employé pour la fabrication de la corde a une grande importance. Le fer doit être très doux et en fils très fins. Il y a intérêt à pouvoir faire varier la tension de la corde.

Cet appareil a une très grande sensibilité, à peu près équivalente à celle du cohéreur et du détecteur électrolytique. Il est d'un usage très commode en raison de sa simplicité.

Détecteurs thermiques. — Bolomètre. — Le bolomètre est basé sur le principe suivant qui a été indiqué par Langley.

Deux fils métalliques fins sont intercalés respectivement dans les branches d'un pont de Wheatstone ; les variations de température de l'un des fils causent des variations de résistance, qui sont accusées par le galvanomètre du pont préalablement équilibré.

Si l'un des fils fins est parcouru par des oscillations électriques, il s'échauffe et le galvanomètre permet, comme on le verra plus loin, d'évaluer l'énergie des oscillations.

Cet emploi du bolomètre a été indiqué par Rubens, Tietz, Fessenden, etc. La figure 131 indique la disposition employée par Fessenden ; *a* est un fil fin enfermé dans une double enveloppe pour empêcher le rayonnement. Mais le peu de sensibilité relative de cet instru-

ment n'a pas permis de l'employer à la réception des signaux de télégraphie sans fil, dans les conditions normales.

En revanche le bolomètre est un détecteur très précieux pour les études théoriques. Nous nous bornerons à indiquer sommairement la manière de constituer et d'utiliser cet instrument d'après M. Tissot.

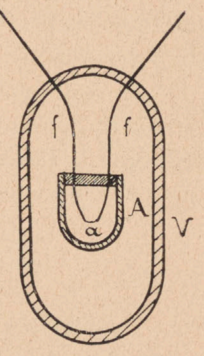


Fig. 131.

Les fils employés doivent être en platine très pur, et leur diamètre compris entre 10 et 20 microns. Il importe de les mettre à l'abri des variations thermiques extérieures ; le procédé le plus simple consiste à les enfermer dans un vase de verre argenté, à double paroi et vide d'air.

Ces fils peuvent être montés dans un pont de Wheatstone suivant deux schémas différents.

Dans le premier de ces montages, chacune des branches

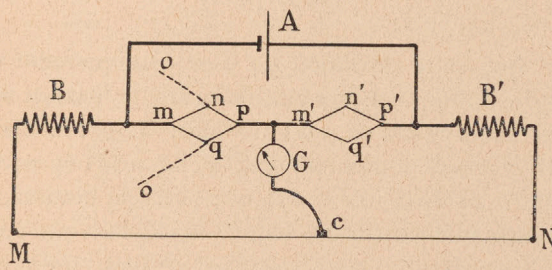


Fig. 132.

du bolomètre est constituée par quatre fils absolument identiques et disposés en forme de losanges $mnpq$, $m'n'p'q'$ (fig. 132). On s'assure que la différence de résistance de ces deux losanges est très faible, et on la mesure. On construit ensuite deux bobines de maillechort B et B', ayant respectivement la même résistance que chacun des

losanges *mnpq*, *m'n'p'q'*. Ces bobines sont placées dans une même cuve pleine de pétrole. On parfait ensuite l'équilibre du pont au moyen d'un curseur *c* se déplaçant le long d'un fil de maillechort MN.

Les oscillations que l'on veut étudier agissent sur le pont par les fils OO et on note la déviation correspondante du galvanomètre G.

Pour étalonner l'appareil, on relie les fils OO à une source de courant continu, auquel on donne une intensité telle que la déviation du galvanomètre G soit la même que celle obtenue sous l'action des oscillations étudiées.

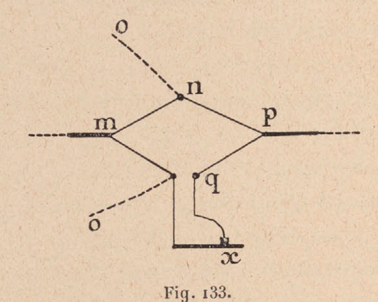


Fig. 133.

Il faut que cette déviation de G soit uniquement due à l'effet du courant continu auxiliaire sur le losange *mnpq*, qui sert dans ce cas de pont auxiliaire. Pour réaliser cette condition, on dédouble la borne *q* (fig. 133) et on intercale entre les deux une résistance variable consistant en un fil de maillechort *x* sur lequel se déplace un curseur muni d'une vis micrométrique. On reconnaît que la condition cherchée est satisfaite en inversant le courant auxiliaire ; le galvanomètre doit indiquer une déviation égale et de signe contraire.

Pour réaliser un bolomètre plus sensible, on peut opérer de la manière suivante.

Le pont est constitué suivant le schéma de la figure 134, qui présente avec le précédent les différences suivantes.

Les branches bolométriques *mn* et *m'n'* ne comprennent chacune qu'un seul fil.

Pour localiser les oscillations que l'on fait agir sur *mn* par l'intermédiaire des fils OO, on place de part et d'autre de *mn* deux selfs *s* et *s'* déterminées de manière à arrêter complètement les oscillations considérées, et cela avec le minimum de spires. Ces selfs sont déterminées empiriquement.

Les bobines BB' ainsi que les selfs *s* et *s'* sont placées dans une même cuve à pétrole. Les deux fils *mn* et *m'n'*

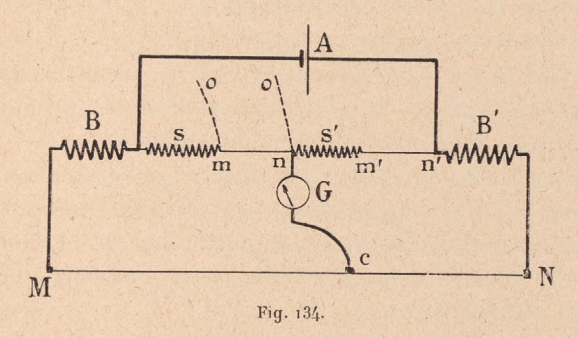


Fig. 134.

sont montés, très près l'un de l'autre, dans la même enceinte.

Le réglage et l'étalonnage se font sans difficultés comme dans le cas précédent.

La sensibilité de l'instrument est telle qu'un courant d'une intensité efficace de 100 microampères donne une déviation d'une dizaine de divisions de l'échelle d'un galvanomètre Broca-Carpentier.

On peut admettre que les déviations enregistrées par le galvanomètre, sous l'action d'oscillations, sont proportionnelles au carré de l'intensité efficace, celle-ci étant l'intensité du courant continu dont l'action sur le bolomètre donne la même déviation du galvanomètre.

Le bolomètre permet de vérifier la loi de répartition de l'intensité des ondes stationnaires créées dans une antenne

de réception placée à plusieurs kilomètres de l'émission. On peut aussi, grâce à lui, établir dans les mêmes conditions les résonances des antennes de réception sur les ondes transmises, en faisant agir les oscillations reçues sur un circuit auxiliaire contenant le bolomètre, et déterminer l'influence des harmoniques dans la mise en résonance d'antennes de formes différentes.

Le bolomètre peut également être employé comme indicateur de courant, dans des ondamètres très faiblement accouplés avec le circuit oscillant à étudier, ainsi que pour les mesures d'amortissement.

Sa résistance étant comprise entre 15 et 50 ohms, il convient de ne pas l'intercaler dans les circuits à étudier, car il augmenterait l'amortissement dans des proportions considérables et masquerait les résonances.

Il a permis à M. Tissot de réaliser un certain nombre d'études et de vérifications des résultats obtenus par divers expérimentateurs et en particulier par M. Duddell, pour le détail desquelles nous renvoyons à la thèse de doctorat de l'auteur.

Thermo-éléments. — Au lieu d'employer les oscillations électriques que l'on veut étudier à chauffer un fil fin dont on apprécie la variation de résistance au moyen d'un pont, on peut les faire passer dans un couple thermo-électrique dont le courant sert alors à évaluer l'énergie de ces oscillations.

Lebedew, Schäffer, Klemencic, etc. ont imaginé diverses formes pour ces thermo-éléments.

Le thermo-élément de Klemencic est constitué de la manière suivante. Deux fils de constantan et de fer, ayant un diamètre de 20 microns, sont disposés en forme de croix de manière à être en contact au point de croisement. Les quatre sommets de la croix sont soutenus, au centre d'un ballon de verre, par des fils de platine qui traversent la paroi du ballon. Celui-ci est amené à un degré de vide

égal à celui d'un tube de Crookes, après avoir été chauffé pendant quelques heures à 180° pour chasser l'eau et l'air adhérents aux parois.

Le résistance de cet instrument est de 4 ohms environ. Sa sensibilité est du même ordre que celle du bolomètre et il peut être employé à des usages semblables.

Thermogalvanomètre. — Le thermogalvanomètre de Duddell est constitué, en quelque sorte, par la combinaison d'un bolomètre et d'un thermo-élément. Les oscillations à étudier traversent un fil fin dont l'échauffement agit sur un couple thermo-électrique, placé tout près de lui et fermé sur lui-même par une boucle de fil de platine. Cette boucle de forme allongée est suspendue dans le champ d'un aimant puissant. Lorsque la chaleur développée dans le fil fin a actionné le couple thermo-électrique, le courant produit par celui-ci circule dans la boucle, qui tourne d'un certain angle. On mesure ces déplacements par la méthode ordinaire du spot lumineux.

La sensibilité de l'instrument peut être modifiée par un changement de la résistance du fil chauffant, ou bien en faisant varier la distance entre ce fil et le thermo-élément.

On obtient aisément des sensibilités du même ordre que celles du bolomètre et l'appareil peut être employé aux mêmes usages. M. Duddell a pu l'utiliser pour l'exécution d'expériences et d'études très complètes sur le fonctionnement des antennes et sur les lois de la propagation des ondes engendrées en télégraphie sans fil.

Nous renvoyons, pour l'exposé détaillé des résultats obtenus, aux mémoires de l'auteur présentés à l'*Institute of electrical Engineers* dans les premiers mois de 1906. Nous nous bornerons à indiquer quelques-uns de ces résultats.

Avec des antennes de 15 m de hauteur, placées à une distance de 400 m environ, la transmission étant faite par

excitation directe avec une étincelle de 7 mm, le voltage maximum induit dans l'antenne de réception est de l'ordre de 7 volts.

Des mesures faites au thermogalvanomètre jusqu'à une distance de 60 milles, entre deux stations maritimes normales de télégraphie sans fil, dont l'une était à bord du *Monarch,* il a pu être déduit que le courant reçu par l'antenne réceptrice est inversement proportionnel à la distance. Mais aux faibles distances, la réflexion des ondes sur les mouvements de terrain agit sur l'énergie reçue et fausse les résultats. Il faut aussi tenir compte de l'action due à la résistance de l'instrument de mesure.

Montages des appareils de réception

Récepteurs à cohéreurs. — Tous les montages employés par les divers constructeurs et ingénieurs dérivent du schéma indiqué page 52 ; ils n'en diffèrent guère que par quelques détails et par les types des appareils élémentaires.

Récepteur Marconi. — Tous les appareils composant le poste récepteur, à l'exception du morse, sont réunis sur une même planchette (fig. 135) et placés dans une boîte en fer reliée à la terre. Cette disposition a pour but d'empêcher les oscillations produites pendant la transmission opérée par la station elle-même, d'agir sur le poste récepteur.

Une paroi de la boîte en fer est mobile et permet, le cas échéant, de retirer la planchette pour régler les appareils.

L'un des fils de connexion du morse avec le circuit du contact du relais est relié à la terre par l'intermédiaire de la boîte en fer. Dans l'autre fil de connexion du morse est intercalée une bobine de self, placée dans une petite boîte en fer pleine de feuilles d'étain froissées, et fixée contre la grande boîte.

Il ne peut donc s'établir, dans ces différents fils de connexion, des oscillations susceptibles d'agir sur le cohéreur pendant la transmission.

La boîte en fer qui contient le poste récepteur est

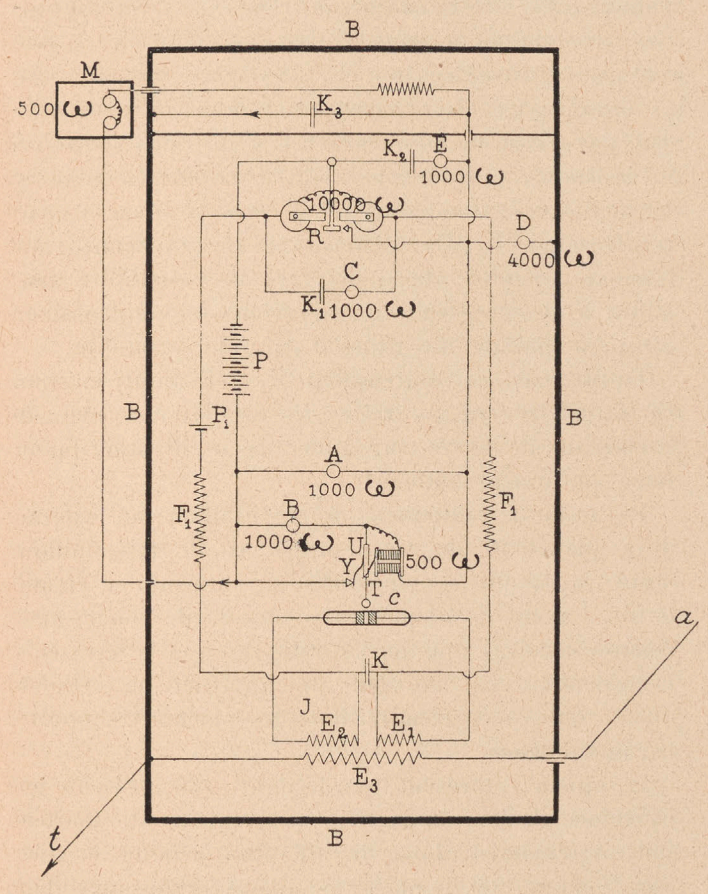


Fig. 135.

portée par un socle en bois, muni de vis calantes, qui permettent de placer la palette du relais dans la meilleure position de sensibilité.

Des shunts sans self sont placés sur toutes les parties

inductives des circuits. Ils sont constitués soit simplement par des résistances sans self, soit par des résistances en série avec un condensateur. En particulier, pour éviter l'usure de la pile du morse et du tapeur par le shunt placé sur le contact du relais, ce shunt est constitué par une bobine sans self de 1 000 ohms E, en série avec un petit condensateur K_2. De même, pour que tout le courant auquel livre passage la conductibilité du cohéreur passe dans les bobines du relais, qui ont 10 000 ohms de résistance, le shunt placé sur ces bobines se compose encore d'une bobine sans self C en série avec un petit condensateur K_1. Ces dispositions ne conviennent que lorsqu'on emploie des cohéreurs de sensibilité assez faible ; il est nécessaire de supprimer les condensateurs lorsqu'on emploie des tubes de grande sensibilité.

D'autre part, un condensateur K_3 a été ajouté en shunt sur la self servant à arrêter les oscillations venant du morse, afin de dériver sur la terre les oscillations qui auraient pu franchir cette self.

Le circuit de résonance (*jigger*) est placé sur le devant de la planchette du récepteur; il est du type indiqué figure 78. Les fils sont enroulés sur un noyau en ébonite de 5 à 10 cm de diamètre, en une seule couche pour chaque circuit. L'antenne est reliée en *a* et la terre en *t*. Le cohéreur *c* est fixé dans une gouttière en celluloïd pincée vers son extrémité dans une mâchoire supportée par une potence.

Le tapeur, représenté par la figure 136, présente une résistance de 500 ohms. Les mouvements du marteau sont extrêmement doux, ils affleurent à peine le cohéreur. Cela permet de placer les cohéreurs sous un voltage voisin de la tension critique, les mouvements imprimés à la limaille par les chocs ne risquant pas de la tasser au point de la réactionner par augmentation de pression. Les mouvements de la palette sont encore adoucis par la présence de shunts sans self-induction sur les bobines et

sur l'étincelle. Le fonctionnement et le réglage sont ceux d'une sonnerie ordinaire.

Le relais est du type Siemens, sa résistance est de 10 000 ohms environ.

Pour vérifier le fonctionnement des divers organes, on fait agir sur le cohéreur les ondes produites à quelques décimètres de distance par l'étincelle de rupture d'une sonnerie électrique sans timbre.

La *sonnerie d'essai* se compose donc d'une sonnerie

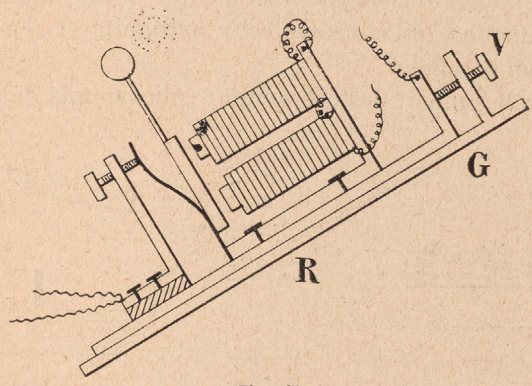


Fig. 136.

sans timbre, de deux éléments de pile sèche fixés derrière elle et d'un bouton de sonnerie.

Pour passer de la transmission à la réception, M. Marconi emploie, dans les stations de faible puissance, le dispositif ci-après.

Le levier L de la clef Morse (fig. 137 et 138) est prolongé par une tige coudée en ébonite T, dont l'extrémité postérieure est traversée par une tige métallique M, munie d'une vis de serrage et d'un marteau. Au repos, celui-ci prend appui sur une enclume reliée à la borne-ligne du récepteur. La vis de serrage est en communication avec l'antenne.

Pour éviter que des étincelles ne puissent jaillir acci-

dentellement, pendant la transmission, entre le marteau et l'enclume et, par suite, mettre le récepteur hors de service, cette enclume est entourée d'une gaine métallique plus élevée qu'elle et reliée à la terre. De plus, pour empêcher des oscillations de s'établir, pendant la transmission, dans le fil de connexion *f* de l'enclume au récepteur, ce fil est anti-inducté, c'est-à-dire recouvert, par-dessus la couche de gutta, d'une couche d'étain reliée à la terre.

Pendant la manipulation, la partie postérieure du levier est maintenue relevée, de manière qu'il y ait toujours un intervalle de 6 à 8 cm entre cette extrémité et l'enclume reliée au récepteur.

Dans la plupart des cas, on juge plus simple de trans-

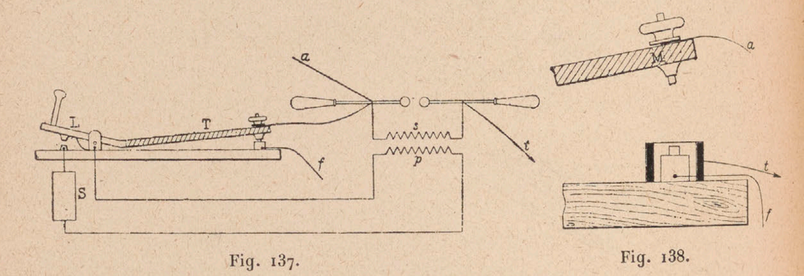


Fig. 137. Fig. 138.

porter, à la main, l'extrémité de l'antenne et de la relier tantôt aux appareils de transmission, tantôt aux appareils de réception.

Aucune modification n'a été apportée depuis plusieurs années à ce récepteur par M. Marconi, l'emploi du récepteur à cohéreur étant de plus en plus délaissé par lui pour le récepteur magnétique.

Récepteur Slaby-Arco. — Tous les appareils composant le poste récepteur, à l'exception de la pile du morse, sont groupés sur un même socle, et disposés comme il est indiqué par la figure 139.

Ce montage présente les dispositions particulières ci-après.

Le circuit du cohéreur est coupé par le mouvement du tapeur, avant qu'il y ait choc sur le tube. Ce procédé avait déjà été indiqué par M. Branly. Un condensateur K ferme le circuit de résonance en évitant le relais.

Il n'existe qu'un pare-étincelles, la petite pile de polarisation *i*. Un rhéostat H permet d'affaiblir l'action des

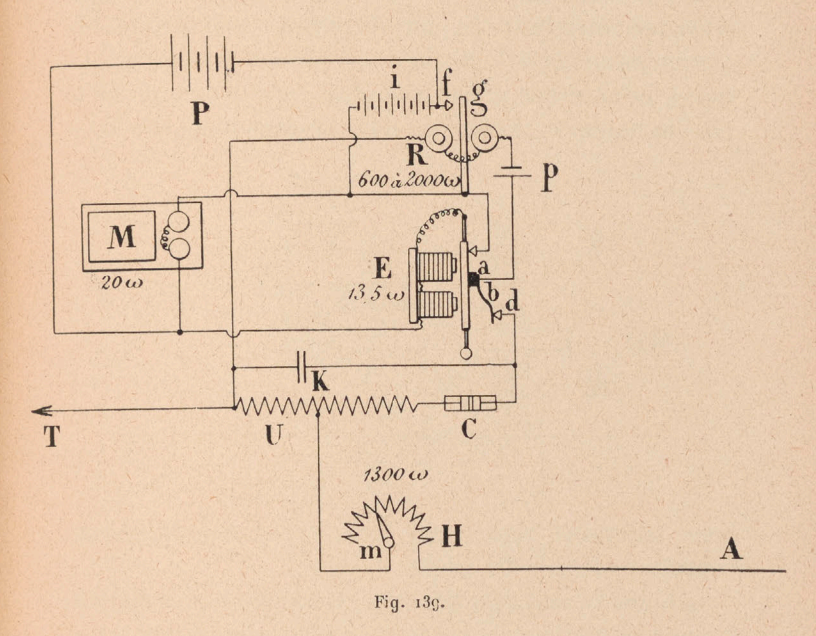


Fig. 139.

oscillations, quand la transmission est faite à petite distance.

Le relais est du type Siemens à très grande résistance.

Le tapeur consiste en un levier en acier AA (fig. 140) mobile autour d'une cheville J insérée dans un bâti en cuivre B, et portant une armature en fer. La course du levier est réglée par une vis F ; G est un ressort antagoniste. L'interruption du circuit du cohéreur se fait entre le ressort R et la vis H. Les vis-butoirs sont réglées de telle sorte que le marteau ne vient au contact du tube qu'après que le ressort R a quitté la vis H.

La résistance des bobines est faible, 13,5 ohms, et l'emploi de shunts pare-étincelles est rendu inutile sur le tapeur par ce mode de montage.

Le shunt du contact du relais est constitué par une pile de polarisation de cinq éléments en forme de champignons de verre de 15 mm de longueur, pleins d'acide sulfurique étendu d'eau. Les électrodes sont des fils de platine de 0,6 mm de diamètre soudés dans le verre. Au repos, cette petite pile est polarisée par le courant de la pile du tapeur et du morse; elle présente alors une résistance suffisante pour éviter toute grave déperdition du courant de la pile du morse.

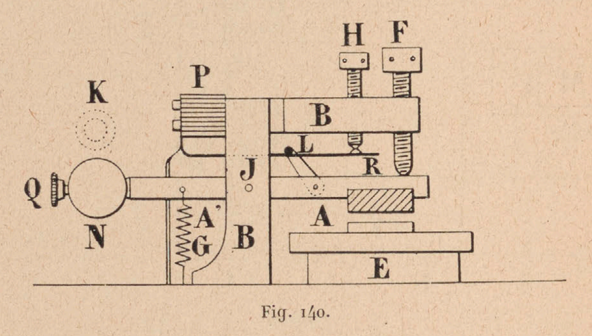


Fig. 140.

Lorsque le relais est actionné, cette petite pile est mise en court-circuit sur le contact; elle se dépolarise, et sa résistance devient suffisamment faible pour livrer passage à l'extra-courant de rupture.

Le jigger ou résonateur est constitué par un solénoïde en fil nu, le long duquel se déplacent deux curseurs.

Pendant la transmission par la station elle-même, le tube n'est pas retiré de son support, il est simplement isolé de son circuit.

Un commutateur triple permet d'ailleurs de couper tous les circuits pendant que l'on transmet; on ne l'a pas indiqué sur la figure pour ne pas compliquer le dessin.

Enfin, quand on passe de la transmission à la récep-

tion ou inversement, on détache simplement l'antenne d'un des postes pour la rattacher à l'autre.

Récepteur Telefunken. — La compagnie Telefunken, créée depuis 1903, a modifié les récepteurs Slaby de la manière suivante.

Le schéma de montage (fig. 141) n'est pas sensible-

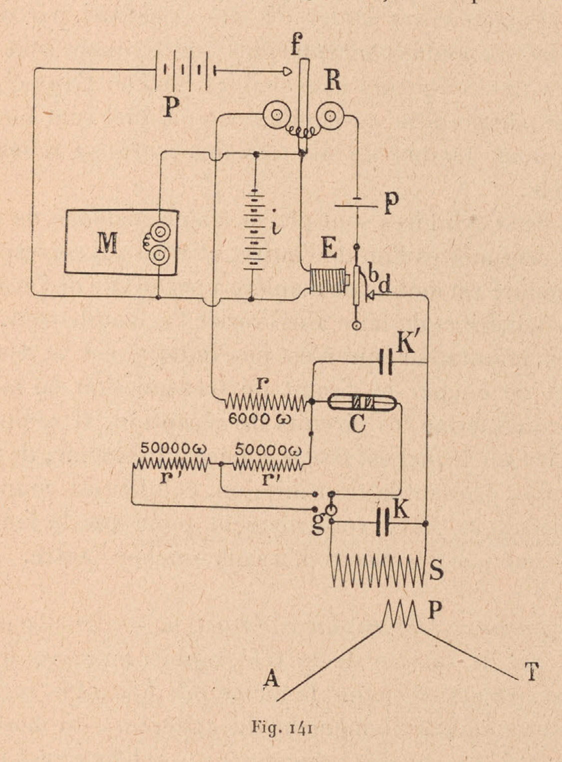


Fig. 141

ment changé, sauf en ce qui concerne le circuit de résonance, qui est à accouplement inductif et variable.

Le tapeur E ne fait pas trembleur par lui-même, c'est la palette du relais R qui provoque les mouvements du marteau. Le circuit du cohéreur est interrompu en *bd* à chacun des mouvements, avant que le marteau frappe sur le

cohéreur. Une résistance de 6 000 ohms *r* est intercalée en permanence dans le circuit.

Une résistance *r'r'* peut être substituée, au moyen d'un commutateur *g*, au cohéreur, pour le réglage du relais à deux sensibilités différentes.

La pile de polarisation *i* est en shunt aux bornes des électro-aimants du morse M et du tapeur E.

Le résonateur ou jigger PS est constitué par deux cylindres d'ébonite concentriques sur lesquels sont enroulées des longueurs convenables de fils. Ceux-ci, au lieu de comprendre un conducteur unique, sont formés d'un grand nombre de fils très fins isolés et reliés en parallèle.

Les deux cylindres sont placés à une distance de plusieurs centimètres l'un de l'autre, et celui qui correspond au primaire est mobile de manière à permettre de l'écarter du secondaire et de faire ainsi varier l'accouplement.

Un commutateur, qui n'est pas indiqué sur le dessin, permet de couper le circuit de transmission en même temps qu'il ferme les circuits de réception. Il comporte un levier sur lequel est fixé le cohéreur lui-même, de telle sorte que, pendant la transmission, celui-ci est coupé de son circuit et placé verticalement pour que la limaille repose sur une des électrodes sans toucher l'autre.

Récepteur « télégraphie militaire ». — Le récepteur établi par le service de la télégraphie militaire diffère des précédents en ce que la même pile fournit le courant nécessaire au fonctionnement du cohéreur, du morse et du tapeur. Le courant nécessaire au cohéreur est réglé (fig. 142) au moyen d'un potentiomètre *p* qui permet de faire varier à volonté la différence de potentiel mise aux bornes du cohéreur et, par suite, la sensibilité de l'instrument.

Tous les appareils, sauf la pile et le morse, sont disposés dans une boîte métallique B dont le couvercle, en forme

de pupitre, est muni d'un dispositif permettant de couper automatiquement les circuits de réception pendant la transmission.

Le relais R est du type à cadre mobile (genre Claude) et a une résistance de 500 ohms, comme le tapeur E et le morse M.

Des shunts *s* de 1 000 ohms sont placés sur toutes les

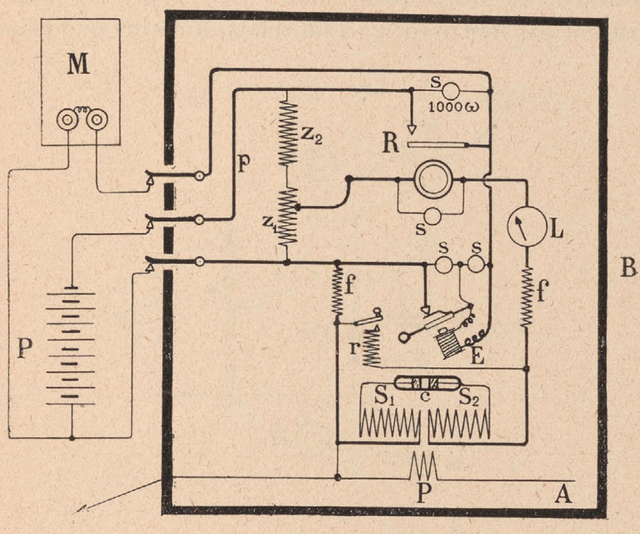


Fig. 142.

résistances inductives des circuits, deux selfs *f* sont intercalées dans le circuit du cohéreur.

Le cohéreur est placé sur une colonne qui peut être déplacée en hauteur au moyen d'un pignon en ébonite, pour régler l'action du marteau; un milliampèremètre, donnant toute la graduation pour un milliampère, est placé en circuit pour permettre de faciliter les réglages et les recherches de dérangement.

Une résistance *r* permet de régler le relais indépendamment du cohéreur.

Le jigger est constitué tantôt par un résonateur à deux

demi-secondaires, comme il est indiqué sur la figure 142, avec accouplement mixte, c'est-à-dire que le primaire et le secondaire ont un point commun, tantôt par un transformateur à un seul demi-secondaire avec accouplement variable.

Récepteurs à détecteurs. — Considérons d'abord le détecteur électrolytique. Comme ses propriétés ne permettent pas de l'associer à un relais, à moins que l'éner-

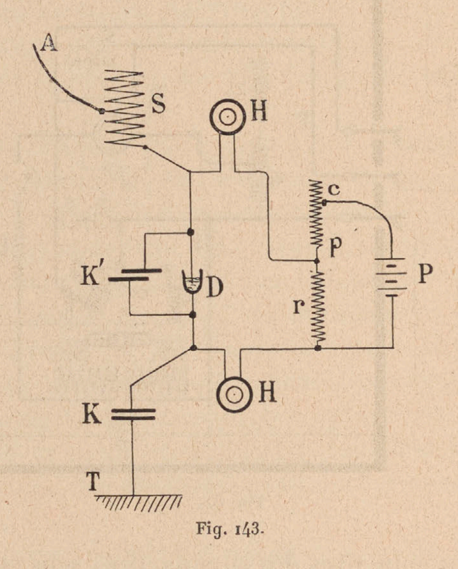


Fig. 143.

gie des oscillations ne soit très considérable, il est toujours employé avec le téléphone, la réception des signaux étant faite au son.

Les montages employés par les divers ingénieurs ou compagnies diffèrent très peu les uns des autres, en raison de la simplicité des circuits nécessaires au fonctionnement de ce détecteur.

Dans le montage à action directe, le détecteur D (fig. 143) est mis en circuit avec deux téléphones H et la résistance *r* d'un potentiomètre *p* monté sur une pile P.

Un curseur *c* permet de faire varier à volonté la force électromotrice mise aux bornes du détecteur.

Un condensateur réglable K′ est mis aux bornes du détecteur. Celui-ci est intercalé directement dans l'antenne A, à laquelle sont adjoints une self S et un condensateur K, réglables tous deux pour obtenir la résonance comme on l'a indiqué page 125. Tous les appareils peuvent être aisément placés dans une même boîte.

Ce montage n'est guère employé que dans les stations très simplifiées.

Pour l'action indirecte par dérivation, le détecteur D

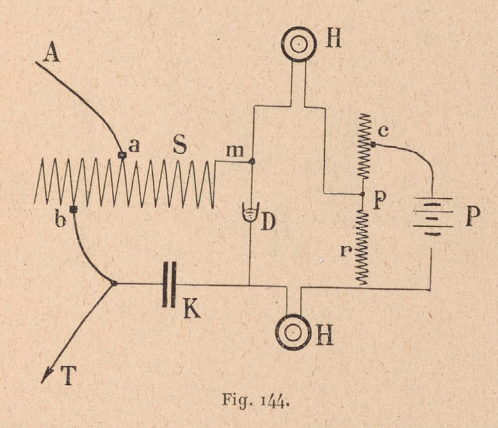


Fig. 144.

(fig. 144) est monté comme dans le cas précédent, avec les téléphones et le potentiomètre.

Un solénoïde S a une de ses extrémités *m* reliée à la pointe du détecteur, l'autre extrémité étant libre. Deux curseurs *a* et *b* se déplacent le long du solénoïde; *a* est relié à l'antenne, *b* à la terre et à une des armatures d'un condensateur, réglable ou non, dont l'autre armature est reliée à la deuxième borne du détecteur.

Le primaire du résonateur est donc constitué par les spires *ab* et le secondaire par les spires *bm*. Nous ne reviendrons pas sur les propriétés de ce montage de résonance, qui a été discuté page 129.

Les curseurs sont quelquefois disposés de manière à pouvoir être rendus solidaires ; on les déplace d'abord l'un après l'autre, puis ensemble, pour chercher la position qui donne la meilleure réception, ou qui permet d'éliminer des perturbations quelconques. Quand le condensateur K est réglable, il faut ajouter aux réglages précédents celui de ce condensateur.

On place aussi quelquefois un autre condensateur réglable aux bornes du détecteur, pour permettre de faire varier l'accouplement, surtout s'il n'est pas prévu une

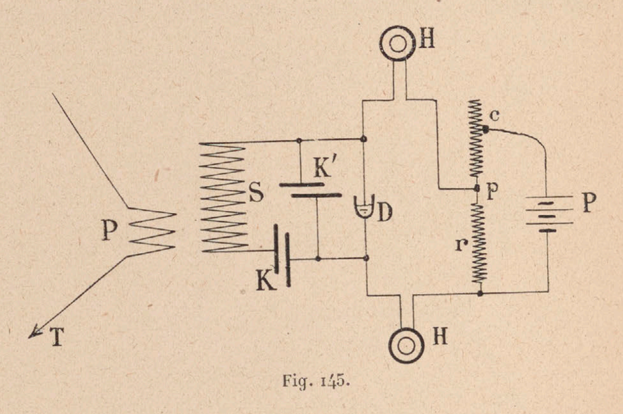


Fig. 145.

self et un condensateur supplémentaires intercalés sur l'antenne.

Chaque récepteur comprend généralement plusieurs détecteurs que l'on met à volonté en circuit au moyen d'un commutateur. Tous les organes peuvent être aisément enfermés dans une boîte portative de petites dimensions.

Les circuits du détecteur et, en particulier, le fil de terre doivent être coupés pendant la transmission, pour éviter une détérioration rapide du détecteur.

Enfin, le montage pour l'action indirecte par induction ne diffère des précédents que par les circuits de résonance (fig. 145). Les enroulements du transformateur PS sont

placés sur des cylindres d'ébonite creux, concentriques, qui peuvent être écartés l'un de l'autre pour varier l'accouplement.

En général, le secondaire n'est pas réglable. Pour

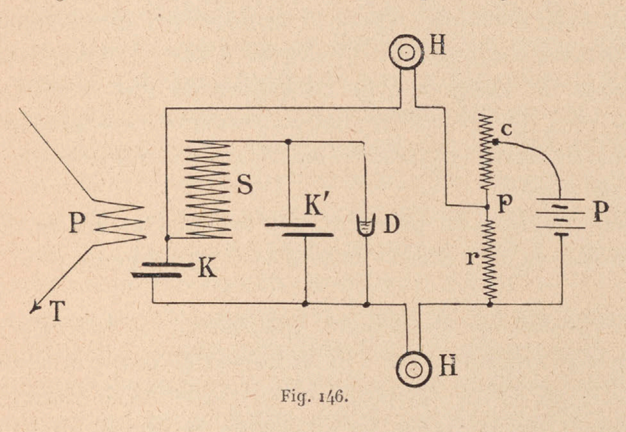


Fig. 146.

passer d'une gamme à la suivante, on change ce secondaire. La mise en résonance sur les ondes comprises entre

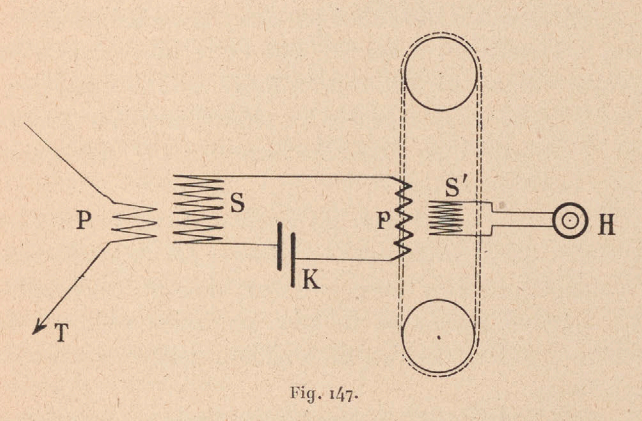


Fig. 147.

celles qui correspondent à deux secondaires est obtenue au moyen des condensateurs réglables.

Le primaire est ordinairement réglable soit au moyen d'un curseur, soit à l'aide de fiches.

On peut également monter le secondaire dans le circuit du détecteur comme cela est indiqué à la figure 146.

Tous les schémas de montage indiqués page 125 peuvent aussi être employés avec le détecteur magnétique; nous nous contenterons d'indiquer à titre d'exemple un schéma de montage avec accouplement par induction (fig. 147). Le secondaire du transformateur est fermé sur un condensateur réglable et sur l'enroulement primaire p du détecteur.

Les réglages du primaire, du secondaire, des accouplements se font comme dans les cas précédents.

Perturbations électriques naturelles. — Les divers dispositifs décrits page 125 et suivantes ont non seulement pour but d'obtenir un bon rendement de l'énergie collectée par l'antenne de réception, en ce qui concerne son action sur le détecteur, mais aussi de mettre dans une certaine mesure le récepteur à l'abri des perturbations qui pourraient être produites par des transmissions étrangères. L'expérience a montré que cette protection n'est vraiment efficace qu'à la condition de réduire considérablement les accouplements et les amortissements des circuits, c'est-à-dire de diminuer beaucoup le rendement et, par suite, la portée.

On pouvait espérer que les perturbations électriques naturelles, qui se traduisent en général par la production de signaux parasites analogues aux signaux télégraphiques, seraient éliminées, ou tout au moins réduites, de la même manière. Il n'en est malheureusement pas toujours ainsi.

La nature et les causes de ces perturbations naturelles ne sont pas encore connues complètement; elles n'ont d'ailleurs pas encore fait l'objet, à notre connaissance, d'études complètes.

Les quelques observations méthodiques que nous avons

pu faire nous ont conduits à classer ces perturbations en trois catégories :

1° Enregistrement des décharges oscillantes causées par des coups de foudre. Cet effet se fait sentir à des distances considérables. Nous avons, en particulier, enregistré dans les environs de Paris tout un orage qui se produisait à Angers, à près de 400 km ; le ciel était absolument pur à Paris. Les signaux parasites tracés sur la bande du morse consistent généralement en un ou deux points, plus rarement un trait quand l'orage est très voisin ; mais il est alors prudent de retirer les appareils du circuit. Ces signaux sont les moins gênants pendant la réception de télégrammes, surtout quand celle-ci est faite au téléphone : les sons produits par les signaux télégraphiques sont nettement différents des sons produits par les signaux parasites et peuvent en être distingués facilement, quand ces derniers ne sont pas très nombreux ou trop intenses.

On a basé sur la production de ces signaux un système destiné à prévenir les agriculteurs de l'approche des orages. Les résultats obtenus ne sont pas encore bien concluants ; car à ces signaux d'orage se mêlent des signaux d'autres origines, comme on le verra ci-après.

2° Variations du potentiel de la prise de terre et de l'antenne, causées par les variations du champ terrestre. Ces variations sont parfois très lentes et ne donnent lieu qu'à des signaux parasites très espacés, souvent régulièrement. D'autres fois, ces variations sont brusques et fréquentes et donnent lieu à de nombreux points ou traits ; ce fait se produit, par exemple, au moment du passage de nuages électrisés.

On observe aussi généralement l'apparition de signaux nombreux au moment du coucher du soleil, moment qui correspond en effet à une variation brusque du potentiel terrestre.

La mise directe de l'antenne de réception à la terre,

dans les montages avec action indirecte, permet seulement d'éviter l'effet des charges statiques et des variations lentes du potentiel.

3° Enfin, il semble qu'il y ait une certaine relation entre les variations de température et la production des signaux parasites. Toutefois, la loi est loin de ressortir nettement des observations faites jusqu'à présent. En Europe, il semble que ces signaux acquièrent leur maximum d'intensité pendant la partie chaude du jour. En particulier, dans la Méditerranée, au cœur de l'été, il n'est guère possible de communiquer après 10 heures du matin, en raison de l'intensité des signaux parasites qui durent jusqu'au lever du soleil, sauf dans le cas où les distances de communication sont très réduites et permettent de diminuer les hauteurs d'antenne et la sensibilité des appareils.

Les études faites au Congo, en 1902, par M. Magne l'ont conduit aux mêmes conclusions ; il a observé des perturbations pendant 157 jours sur 175, mais grâce au dispositif imaginé par lui, que nous indiquons ci-après, cette proportion a pu être réduite notablement.

Dans l'installation provisoire de télégraphie sans fil faite entre la Martinique et la Guadeloupe, on a reconnu l'impossibilité de communiquer la nuit, les signaux parasites se produisant principalement entre le coucher et le lever du soleil.

Toutes les influences que l'on vient d'énumérer se font sentir d'autant plus que l'antenne est plus haute et que les détecteurs sont plus sensibles.

On a imaginé un certain nombre de dispositifs pour empêcher l'action de ces influences perturbatrices naturelles. Bien qu'aucun de ces procédés n'ait une efficacité absolue, nous citerons les plus intéressants.

Le dispositif Voisenat-Tissot consiste à mettre directement l'antenne à la terre à travers une self f (fig. 148) convenablement choisie.

M. Magne a obtenu de bons résultats en intercalant entre l'antenne et le récepteur (fig. 149) une self *f* et un condensateur K réglable. On crée ainsi deux voies pour les oscillations de l'antenne et on conçoit que l'on puisse

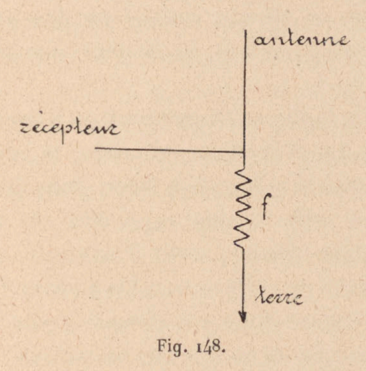


Fig. 148.

faire interférer les oscillations parasites de manière à annuler leur effet sur le récepteur, alors que les oscillations utiles, qui ont une longueur d'onde différente, n'interfèrent pas complètement et agissent sur le récepteur.

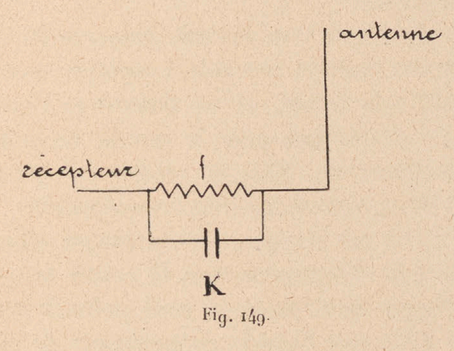


Fig. 149.

On pourrait également remplacer le condensateur par une deuxième self réglable.

Le dispositif Mounier consiste à employer une deuxième antenne, beaucoup moins haute que la première, et à la faire agir sur le récepteur, en sens inverse de celle-ci (au moyen d'un deuxième primaire du jigger enroulé en sens

inverse du premier, par exemple). Les signaux parasites sont ainsi reçus par les deux antennes et annulent leurs effets sur le récepteur, les signaux utiles sont perçus seulement par l'antenne élevée.

MM. Jehenne et Martin emploient des procédés analogues aux deux premiers, mais avec des résistances liquides.

M. Marconi a indiqué récemment un procédé qui consiste à établir sur l'antenne, pendant la réception, une série de dérivations reliées à la terre, dans lesquelles sont intercalées des selfs et des capacités, de manière que chaque dérivation donne, avec l'antenne, une certaine période différente de celle des ondes à recevoir. Les ondes parasites trouveront donc un circuit à peu près accordé sur elles ; elles agiront moins sur les autres et, en particulier, sur le circuit de réception.

Ce dispositif ne semble pas plus efficace que les autres, car les ondes parasites, qui sont très amorties, engendrent dans l'antenne des oscillations qui ont la période propre de celle-ci.

Il semble donc que l'on devrait désaccorder l'antenne par rapport aux ondes à recevoir, employer un accouplement inductif très faible, et ne conserver l'accord sur les ondes à recevoir que pour le circuit secondaire qui agit sur le détecteur. Mais le rendement est ainsi diminué dans des proportions trop considérables.

En réalité, on est impuissant à protéger efficacement les récepteurs de télégraphie sans fil contre les perturbations électriques naturelles; le seul palliatif consiste à transmettre avec une énergie considérable de manière à pouvoir employer des détecteurs peu sensibles, ce qui revient à dire que les signaux télégraphiques doivent être plus intenses que les signaux parasites.

Influence de la lumière solaire. — Au cours des expériences faites pour essayer d'établir une communication

entre l'Europe et l'Amérique, M. Marconi a constaté que l'intensité des signaux reçus à très grande distance était beaucoup plus considérable la nuit que le jour et que la portée d'une station puissante s'accroissait au fur et à mesure que la lumière solaire diminuait.

Ce fait a été vérifié depuis par un grand nombre d'expérimentateurs, mais le phénomène ne devient sensible, dans les climats tempérés, que pour des distances supérieures à 500 km ; sous les climats tropicaux, cette distance limite est notablement réduite.

CHAPITRE IX

HISTORIQUE ET ÉTAT ACTUEL DES APPLICATIONS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

L'idée d'utiliser les propriétés des ondes électriques pour la transmission des signaux paraît appartenir au savant physicien anglais Lodge qui, dans une conférence faite en 1894, émit l'opinion que la présence d'ondes électriques, produites par la décharge d'un condensateur, pouvait être décelée, au moyen du tube de Branly, jusqu'à une distance d'un demi-mille de leur point de production, mais aucune expérience ne fut tentée pour vérifier le fait.

En 1895, Popoff employa le dispositif décrit page 47 pour déceler la présence d'ondes hertziennes dans l'atmosphère. Il indiqua ensuite que le même récepteur pourrait recevoir des signaux Morse transmis par un ondulateur assez puissant, mais il ne fit ses premiers essais que postérieurement à ceux de M. Marconi.

En 1896, M. Marconi réalisa le premier une véritable communication par ondes hertziennes ; depuis cette époque il a continué à perfectionner ses premiers dispositifs, et l'on peut dire qu'il est encore à l'heure actuelle, de tous les ingénieurs s'occupant de télégraphie sans fil, celui qui a fait progresser le plus la question.

Toutefois, il est juste de reconnaître qu'un bon nombre de perfectionnements et d'études techniques ont été faits en dehors de lui, ainsi qu'on a pu s'en rendre compte au cours de cet ouvrage. Mais la grande difficulté de réali-

ser des expériences, toujours très coûteuses en raison des installations nécessaires, n'a permis qu'aux puissantes compagnies et à quelques services d'État de donner une impulsion utile au nouveau moyen de communication.

Les étapes successives de la télégraphie sans fil sont les suivantes :

De 1896 à 1900, le premier dispositif imaginé par M. Marconi, avec quelques variantes, fut seul appliqué, sans aucune tentative de mise en résonance réelle.

En 1901, furent réalisés les premiers dispositifs dits syntonisés, de Braun et Marconi.

En 1905, l'importance de l'amortissement et le rôle des accouplements furent mis en évidence par Slaby, Drude, Wien, Abraham, Seibt.

En 1906, eurent lieu les premières tentatives d'emploi des oscillations non amorties.

Nous décrirons sommairement un certain nombre d'applications et d'expériences réalisées par divers expérimentateurs dans chacune de ces périodes.

Expériences entre la France et l'Angleterre. — Dans la première période, l'expérience la plus intéressante fut l'établissement d'une communication radiotélégraphique entre la France et l'Angleterre, par M. Marconi, en 1899. L'autorisation d'effectuer cette installation ne fut accordée que sous condition qu'une commission française suivrait toutes les expériences et que la station française serait démolie à leur issue.

Les stations furent installées, l'une à Wimereux (fig. 150), l'autre à South-Foreland (fig. 151), la distance étant de 46 km.

Les supports d'antennes étaient constitués par des mâts de 45 m de hauteur, qui fut ensuite réduite à 37 m, mais ne put l'être davantage.

La transmission était faite par excitation directe des

antennes, au moyen de petites bobines d'induction de

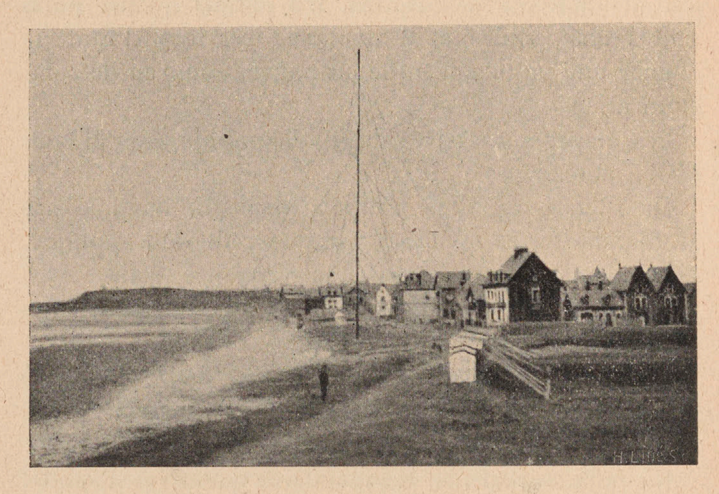


Fig. 150.

25 cm d'étincelles actionnées par des piles sèches. La

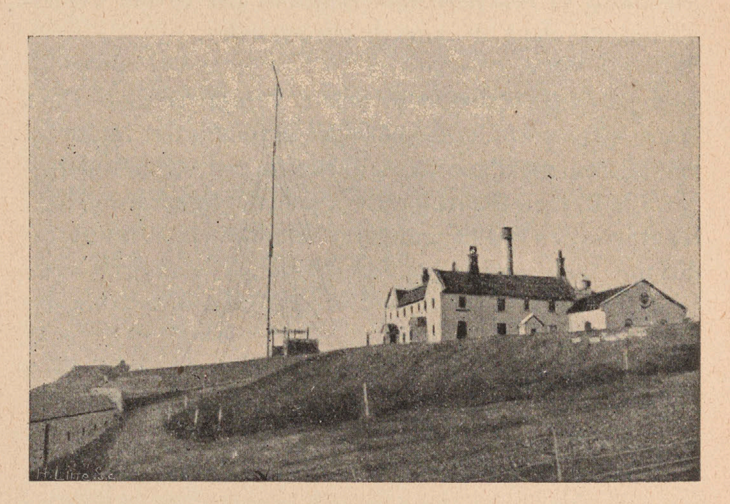


Fig. 151.

réception était effectuée au moyen d'un petit transforma-

teur (jigger), dont la construction était tenue secrète, agissant sur le cohéreur. Le schéma était semblable à celui de la figure 135.

Les expériences faites furent les suivantes :

Expériences de communication simple entre les deux stations et avec un navire de guerre français, *l'Ibis* (fig. 152), puis la *Vienne,* dont les antennes avaient respectivement 22 et 31 m.

Expériences analogues, les navires se déplaçant le long

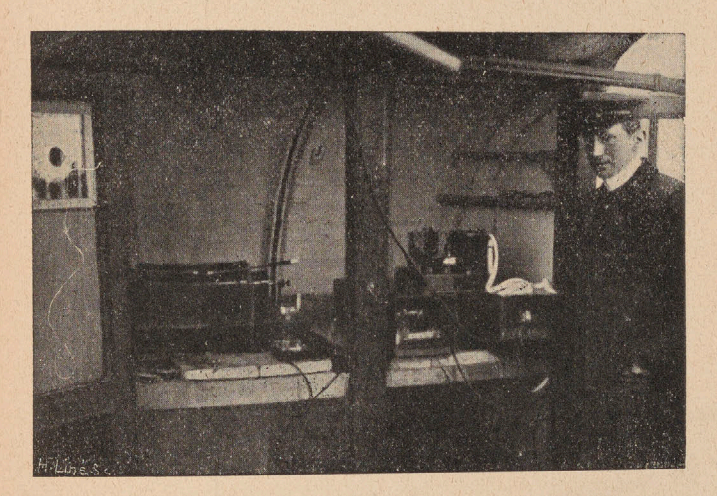


Fig. 152.

de la côte, de manière à interposer des obstacles sur les lignes de communication.

Essais de syntonisation.

Les deux premières séries d'expériences donnèrent des résultats excellents; les portées atteintes furent de 50 km environ (au maximum), sans obstacles, et de 20 à 25 km avec interposition du cap Gris-Nez.

Quant aux expériences de syntonisation, elles ne donnèrent que des résultats incertains; leur durée fut d'ailleurs très courte.

Expériences entre la France et la Corse. — Les premières expériences avec des appareils vraiment mis en résonance furent faites par M. Marconi en 1901, entre la France et la Corse. L'autorisation d'exécuter ces expériences ne fut encore accordée que sous condition

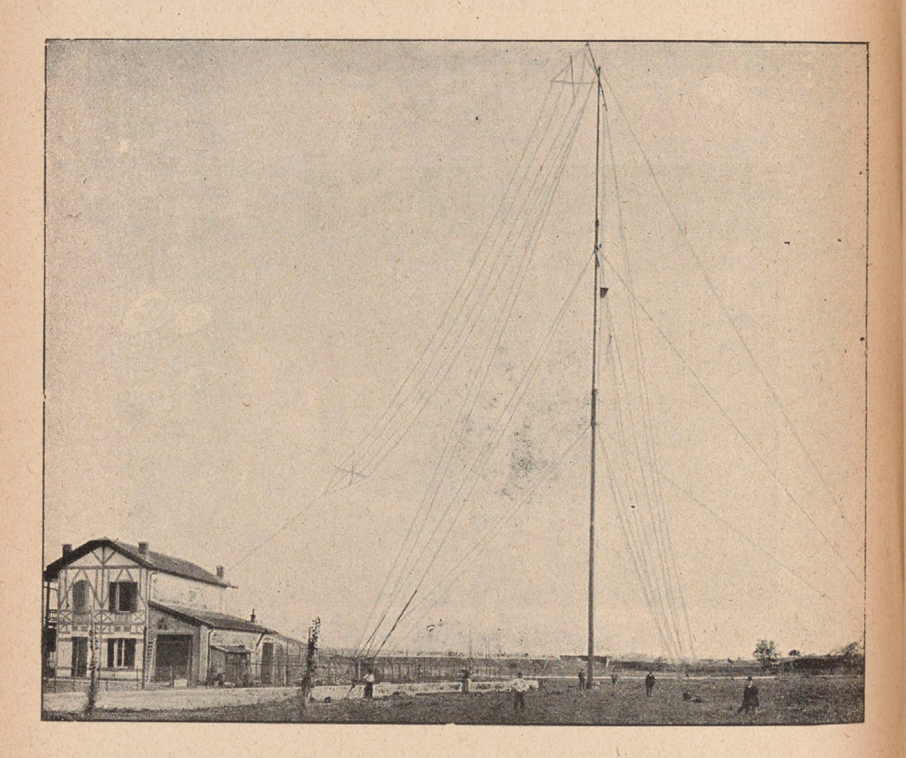


Fig. 153.

qu'elles seraient suivies par une commission officielle et que les stations seraient démolies à leur issue.

Celles-ci furent installées, l'une à Biot, près d'Antibes (fig. 153), l'autre à Calvi (Corse) [fig. 154], la distance étant de 175 km environ.

La transmission était effectuée par excitation indirecte

de l'antenne, au moyen d'un transformateur Tesla. L'énergie électrique était fournie par de petits accumulateurs

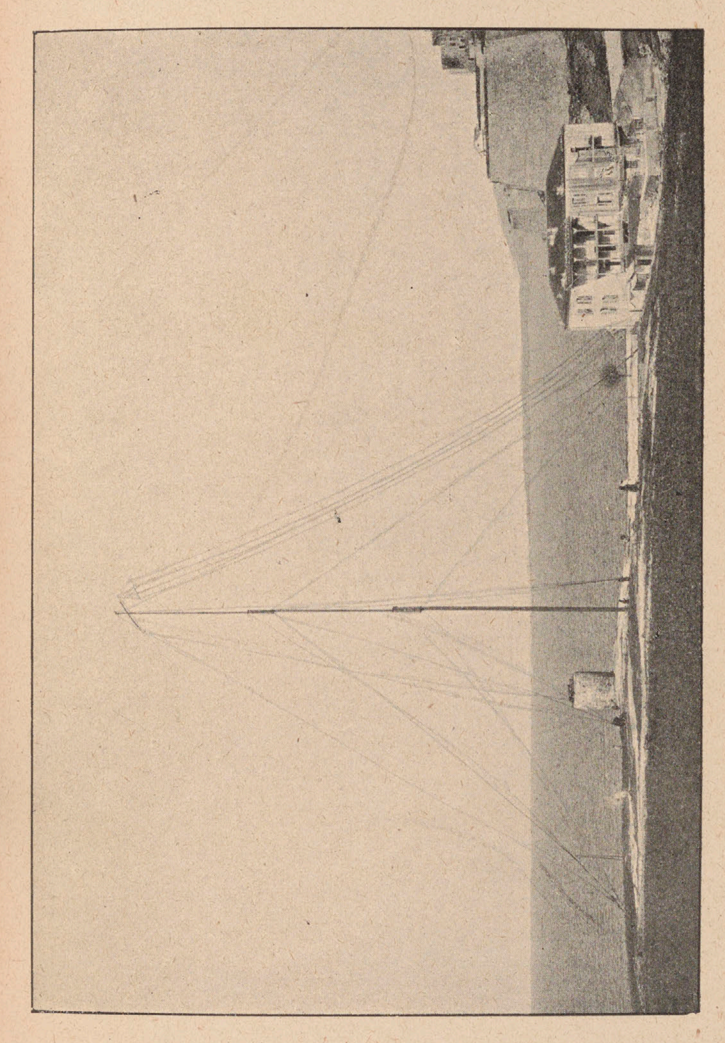


Fig. 154.

actionnant deux bobines d'induction de 25 cm montées en parallèle (fig. 155 et 156).

La réception était faite au cohéreur, suivant le schéma de la figure 135.

Les antennes, dont la hauteur était de 55 m environ, étaient supportées par des mâts analogues à des mâts de navires. Elles comprenaient quatre conducteurs en paral-

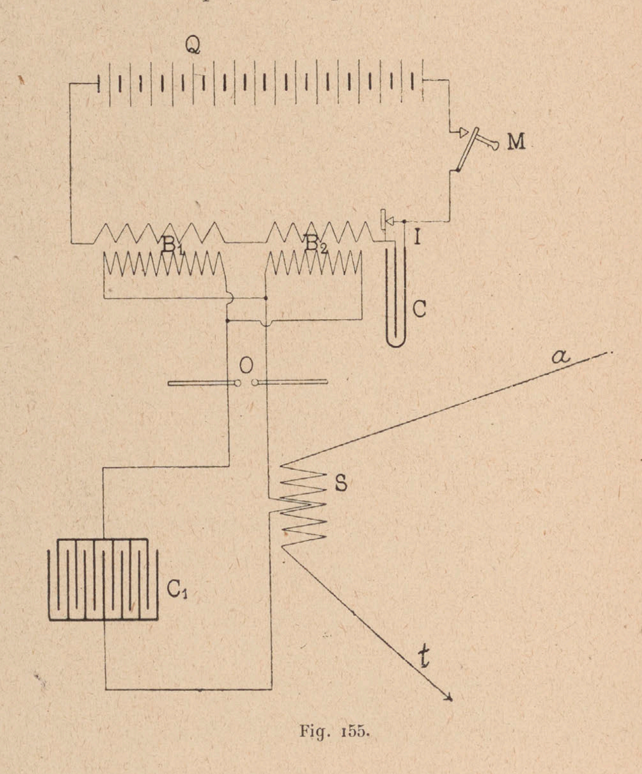


Fig. 155.

lèle, montés suivant les arêtes d'un prisme de 1,5 m de côté.

Les expériences furent les suivantes :

Communication simple entre les deux stations, avec des longueurs d'onde différentes.

Communication avec le navire *Princesse-Alice,* appartenant au prince de Monaco.

Essais de double communication.

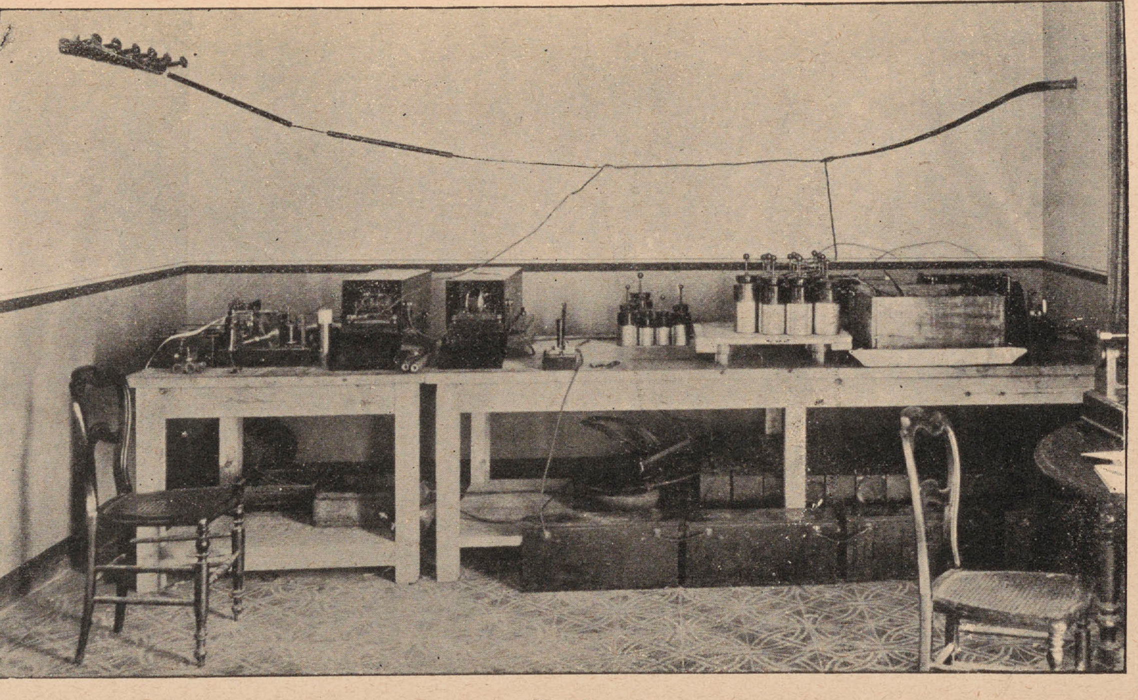


Fig. 156

La première série donna des résultats excellents : les communications purent être établies avec trois longueurs d'onde très différentes, 300, 200 et 70 m. La plus longue, correspondant à peu près à la longueur d'onde propre de l'antenne, donna toutefois les résultats les meilleurs. On vérifia également que la stabilité des divers réglages était suffisante pour permettre un service ininterrompu pendant trois heures consécutives. La vitesse de transmission put atteindre quatorze mots à la minute.

Les expériences de communication avec la *Princesse-Alice* furent également couronnées de succès : la distance franchie fut supérieure à 150 km.

Quant aux expériences de double communication simultanée, elles ne donnèrent pas de résultats bien satisfaisants. Deux télégrammes étaient transmis simultanément dans la même antenne avec deux longueurs d'onde différentes, et la réception était effectuée aussi dans une même antenne, au moyen de deux récepteurs. On parvint à régler les récepteurs de manière que chacun d'eux n'enregistrât isolément qu'un seul des télégrammes, mais, lorsque tous deux étaient reliés simultanément à l'antenne, les signaux se brouillaient.

Pendant ces expériences, un récepteur fut installé à une distance de 50 km environ de Biot, et on put constater que cet appareil enregistrait, sans aucun accord, tous les télégrammes transmis par Biot, quelle que fût la longueur d'onde employée.

Expériences de la télégraphie militaire. — L'établissement central du matériel de la télégraphie militaire s'est occupé, dès 1898, de rechercher les moyens d'appliquer la télégraphie sans fil aux besoins militaires. Il est parvenu à créer peu à peu un matériel spécial, entièrement étudié par lui, donnant des résultats comparables à ceux que l'on obtient avec les appareils des compagnies étrangères.

Nous citerons quelques-unes des principales expériences faites avec la collaboration du capitaine Becq.

Deux stations d'études furent tout d'abord installées

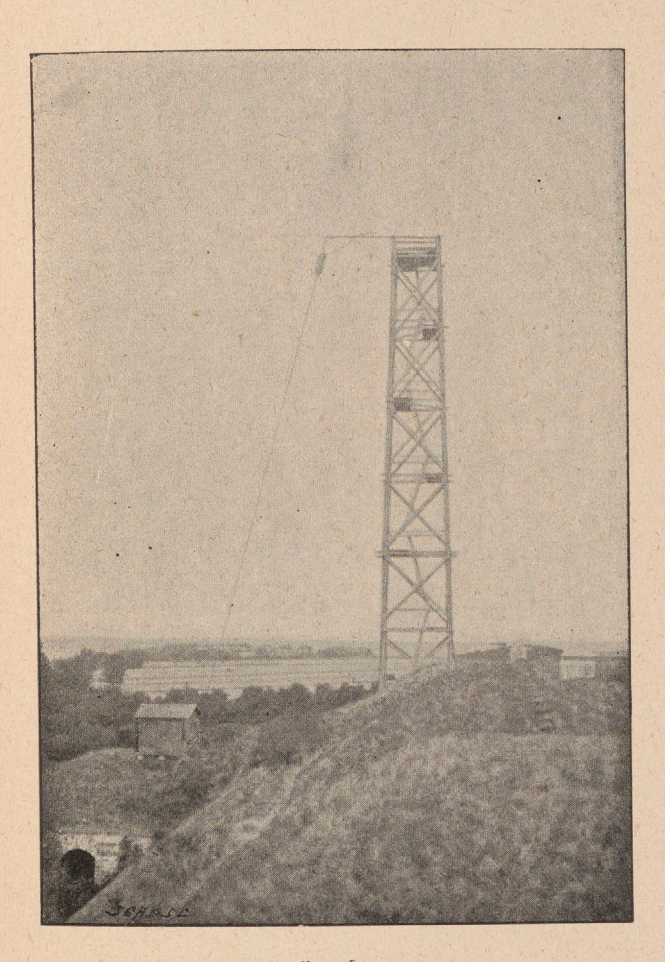


Fig. 157.

dans différents forts des environs de Paris, et finalement placées à demeure aux forts de Villeneuve-Saint-Georges et de Palaiseau (fig. 157 et 158). C'est dans ces stations

que fut expérimenté pour la première fois le détecteur électrolytique Ferrié, en 1900.

Pour étudier l'influence des hauteurs d'antennes, des essais furent entrepris aux environs de Lorient et à Belle-Ile, en 1901. De petits ballonnets de 60 m^3, gonflés au gaz d'éclairage et retenus au moyen d'un câble métallique servant aussi d'antenne furent employés pour ces expériences (fig. 159). Les appareils étaient disposés dans des voitures-poste convenablement aménagées. On

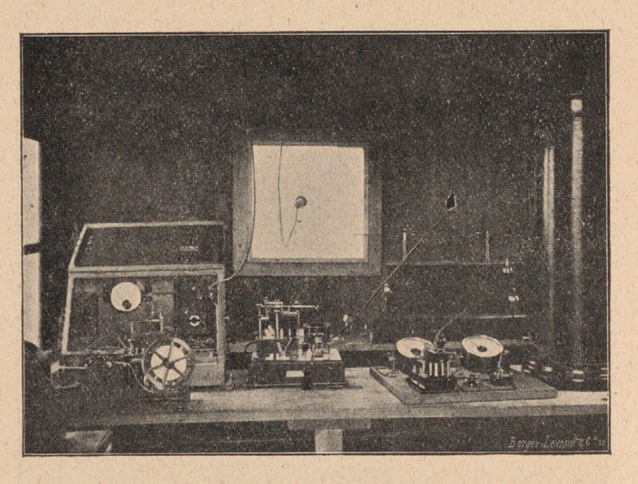


Fig. 158.

reconnut ainsi qu'avec une hauteur de 30 m et une énergie de 80 watts environ, il était facile de communiquer à 50 km.

Des essais furent également entrepris entre le grand phare de Belle-Ile et la tour du port de Lorient (fig. 160). La communication fut établie avec moins de 50 watts.

En 1902, de nouvelles expériences furent entreprises pour juger de la portée limite qui pouvait être atteinte en mer, en faisant usage d'antennes de 40 à 50 m de hauteur et d'une énergie de 150 à 200 watts. Pour cela,

une station de transmission fixe fut installée à Belle-Ile (fig. 161) et un poste de réception fut successivement

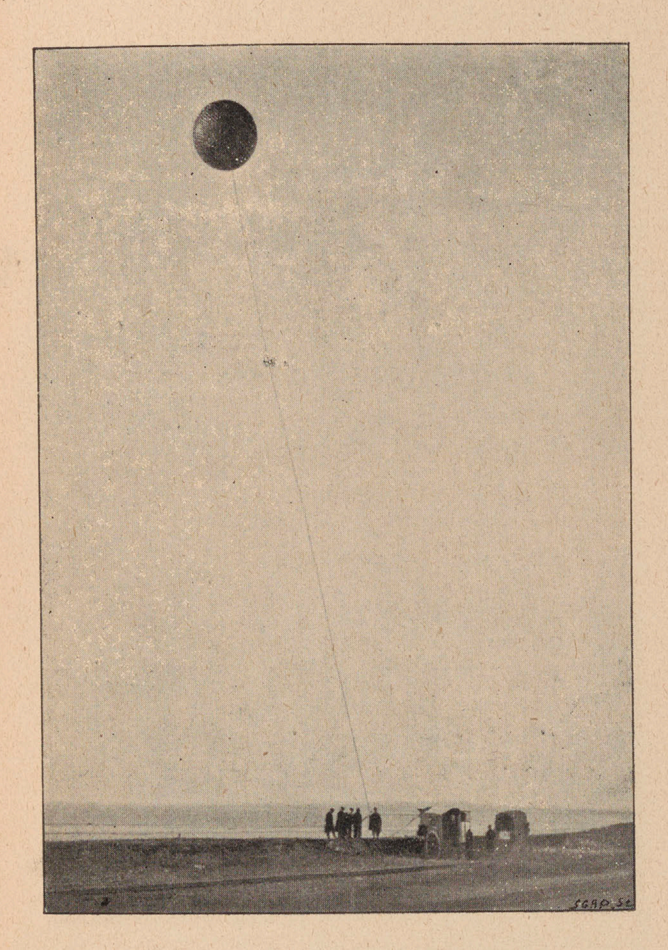


Fig. 159.

installé dans les phares d'Eckmühl (Finistère), des Baleines (île de Ré), de la Coubre (Gironde) [fig. 162]. Ce dernier est à une distance de Belle-Ile égale à 240 km. Partout, la communication fut établie sans difficultés.

En 1903, des essais analogues furent poursuivis, en augmentant l'énergie mise en jeu et en employant deux

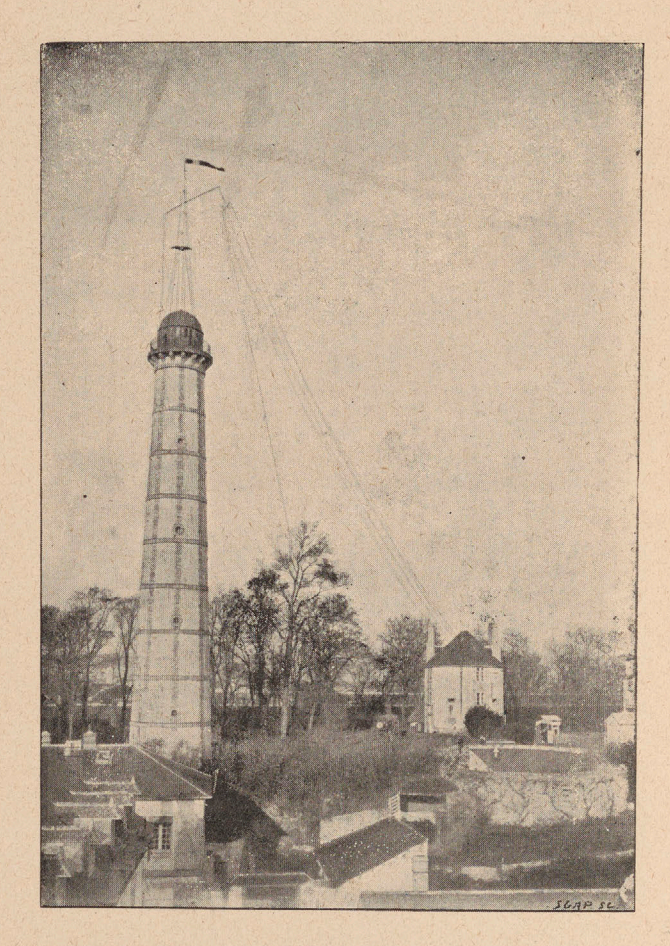


Fig. 160.

bobines d'induction couplées en parallèle. La distance franchie atteignit 400 km en mer, avec des hauteurs d'antennes de 50 m.

En 1902-1903, la télégraphie militaire fut chargée d'ins-

taller une communication radiotélégraphique entre la

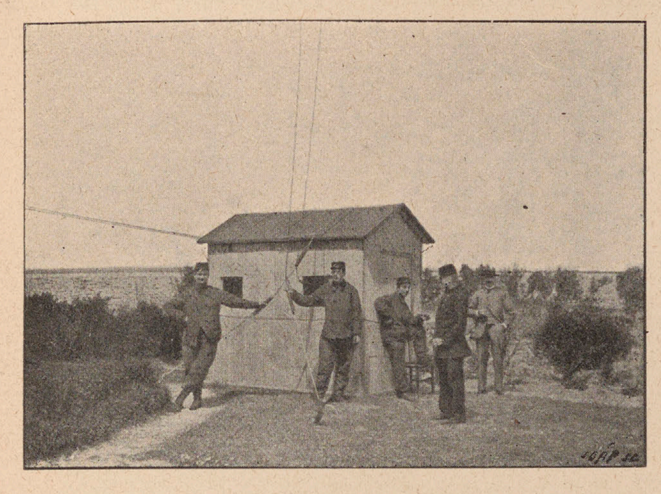


Fig. 161.

Martinique et la Guadeloupe (180 km), pour remplacer

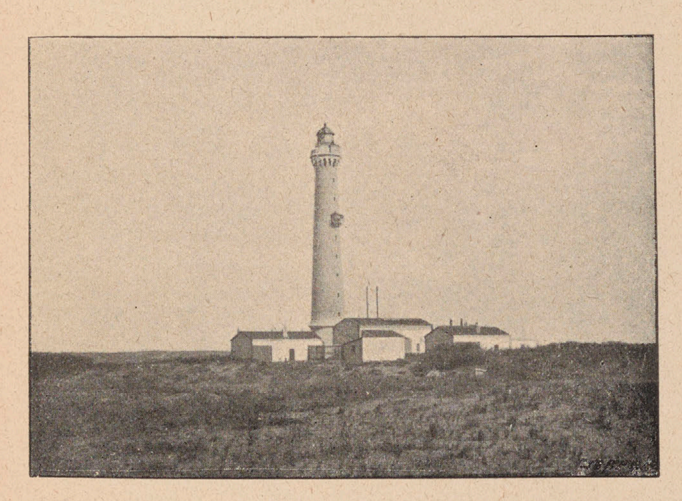


Fig. 162.

le câble détruit par l'éruption de la Montagne-Pelée, jus-

qu'à ce que ce câble ait pu être réparé. Le personnel et le matériel nécessaires furent demandés le 12 septembre

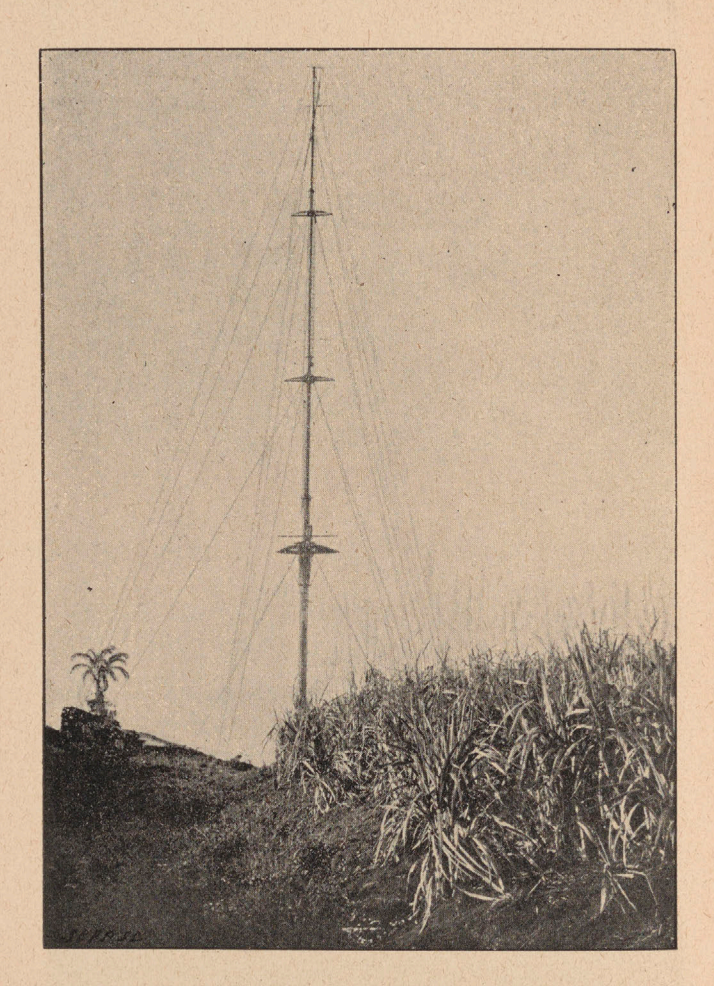


Fig. 163.

1902, l'embarquement eut lieu le 26 septembre, et les premiers télégrammes furent échangés le 4 décembre.

Une des stations était installée à Beauséjour, près La

Trinité (Martinique) [fig. 163 et 164] par le capitaine Ferrié, l'autre à La Verdure, près Pointe-à-Pitre (Guadeloupe) [fig. 165 et 166], par M. Magne. Le service fut ensuite assuré par les soins du lieutenant Mounier jusqu'à la fin de 1903, époque à laquelle le câble fut réparé et les stations démolies.

Indépendamment de ces expériences en mer, des essais de communication à l'intérieur des terres furent réalisés dès 1901, les antennes étant supportées par des ballon-

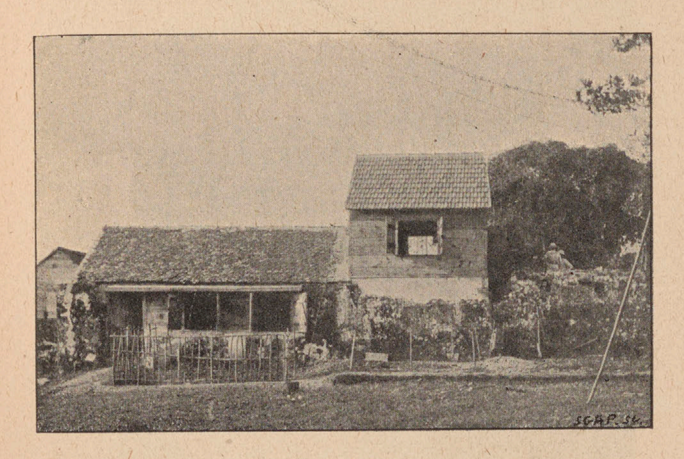


Fig. 164.

nets (fig. 167) et les appareils étant placés dans des voitures (fig. 168). Les distances franchies dans les environs de Paris furent de 50 km en 1901, 150 km en 1902.

En 1903, les ballonnets étant remplacés par des ballons captifs s'élevant à une hauteur de 300 m (fig. 169 et 170), les communications furent établies sans difficulté entre Paris et Belfort (400 km environ).

Enfin, la même année, une première installation provisoire fut faite à la tour Eiffel en vue de remplacer le ballon de la station de Paris. Les essais furent couronnés de succès, et, en modifiant successivement la forme d'an-

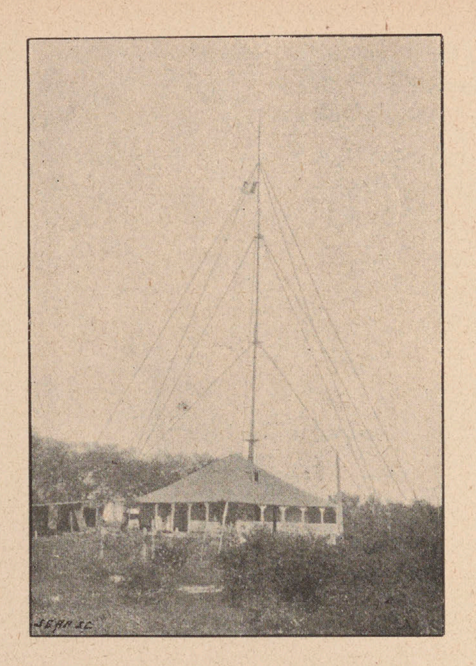


Fig. 165.

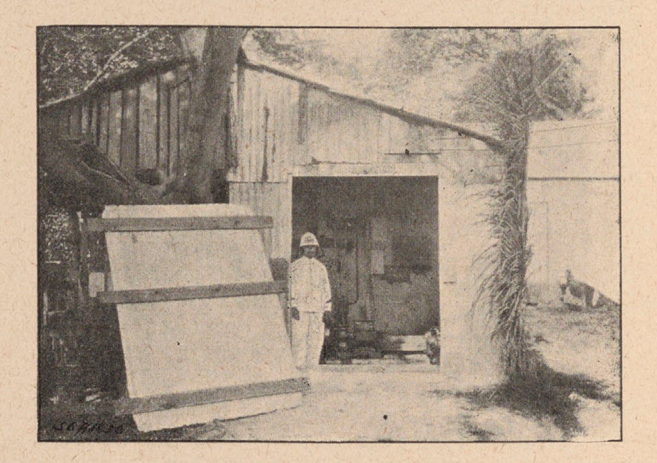


Fig. 166

tenne et les procédés de transmission, la portée de la

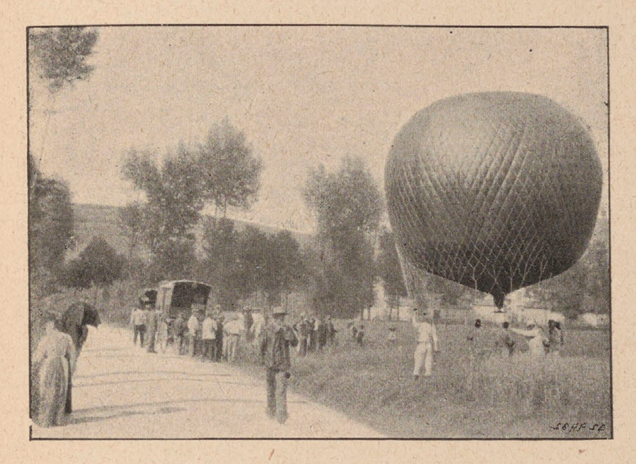


Fig. 167.

station fut peu à peu augmentée jusqu'à atteindre 1 500 km.

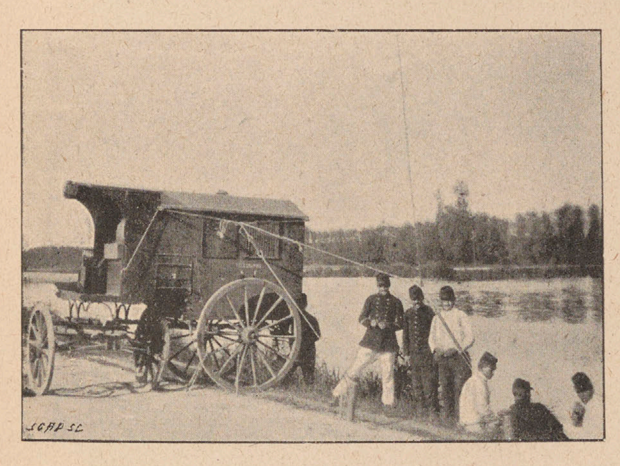


Fig. 168.

Nous reviendrons plus loin sur ce sujet, à propos des stations puissantes.

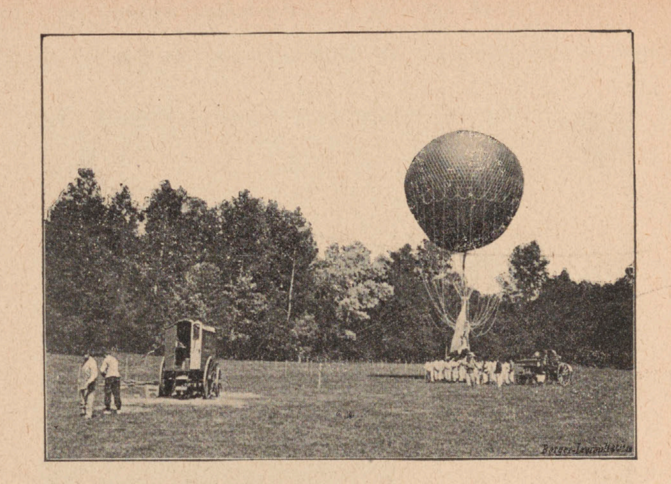


Fig. 169.

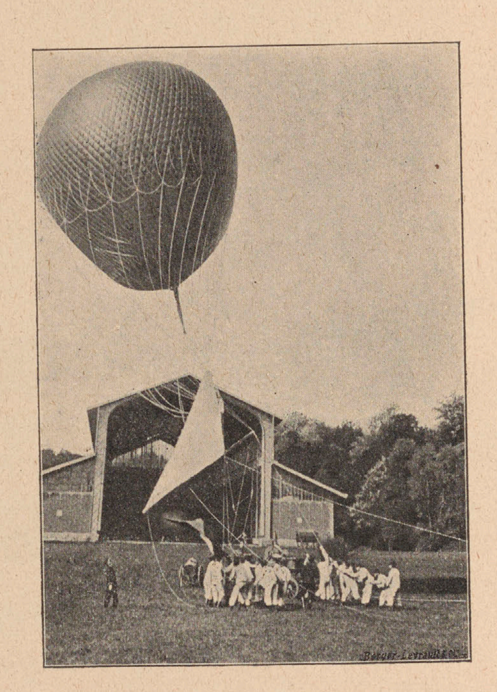


Fig. 170.

Expériences de la marine française. — La marine de guerre française s'est occupée dès la première heure de tirer parti du nouveau moyen de communication, qui est le seul permettant la liaison des navires quand ils sont hors de vue.

En dehors des travaux théoriques très appréciés de M. Tissot, de nombreuses expériences et applications ont été réalisées, surtout depuis qu'un organe spécial, la commission centrale de télégraphie sans fil de la marine, présidée par l'amiral Arago, puis par l'amiral Gaschard, a pu centraliser et diriger les efforts.

Cette commission a elle-même installé des stations d'études dans la Méditerranée, à Port-Vendres, Agde et Porquerolles; elle a créé dès 1902 un matériel qui a permis, dans certaines circonstances favorables, de communiquer jusqu'à 500 km (communication entre le *Bruix*, partant en Chine, et Port-Vendres, 1906). Tous les navires de guerre, actuellement munis de la télégraphie sans fil, communiquent à des distances au moins égales à 250 km.

Ce matériel sera prochainement transformé, pour tenir compte des derniers progrès sur la question des accouplements et des amortissements, d'après les études et les modèles établis par les divers membres de cette commission centrale, dont l'un de nous fait partie.

Applications diverses. — Les services de l'État ne furent pas seuls à s'occuper activement de la télégraphie sans fil en France, et il est juste de citer les travaux très intéressants de M. Rochefort, qui a installé déjà un assez grand nombre de stations commerciales, tant en France qu'à l'étranger.

En Angleterre et en Italie, la plupart des applications et des expériences sont faites par la compagnie Marconi, et un grand nombre de stations militaires et commerciales ont été créées. Il convient de citer cependant les expé-

riences faites en Angleterre par MM. Lodge et Muirhead, M. Maleskyne, le commandant Jackson, etc., et en Italie par M. Artom.

En Allemagne, les études et applications ont reçu un développement exceptionnel, grâce aux travaux de Slaby, Drude, Zenneck, Abraham, Seibt, Arco, etc., et à la formation d'une puissante compagnie, la Telefunken.

Le nombre des stations terrestres et maritimes existant actuellement est considérable. L'organisation militaire est très complète et l'on peut dire que la télégraphie sans fil donne en Allemagne son maximum de rendement ; peut-être même a-t-on exagéré le nombre des applications.

En Russie, la guerre russo-japonaise a été l'occasion d'un développement considérable de la télégraphie sans fil. Les installations furent tout d'abord faites avec le matériel de MM. Popoff et Ducretet, mais actuellement ce sont les appareils des compagnies Telefunken et Marconi qui sont employés.

Aux États-Unis, deux puissantes compagnies américaines, les compagnies Fessenden et de Forest, font une concurrence souvent heureuse aux compagnies Marconi et Telefunken. Le nombre des applications est très considérable : les côtes américaines sont littéralement couvertes de stations radiotélégraphiques de tous systèmes. Aussi l'échange de correspondances y est-il très difficile.

Au Japon, les premières installations furent faites par la compagnie Marconi, mais au cours de la guerre russo-japonaise, dans laquelle la télégraphie sans fil rendit d'immenses services à l'amiral Togo, les appareils employés provenaient de la fabrication nationale, suivant les indications de M. Kimura. Depuis la fin de la guerre, les applications se sont encore multipliées.

Enfin, dans tous les pays, la télégraphie sans fil prend une importance de plus en plus considérable, malgré sa complication et ses inconvénients, en raison des services

importants qu'elle rend néanmoins à la navigation et qu'elle peut rendre en cas de guerre.

Stations puissantes. — Il convient de faire une mention spéciale des stations puissantes que l'on crée depuis quelques années, surtout dans un but militaire.

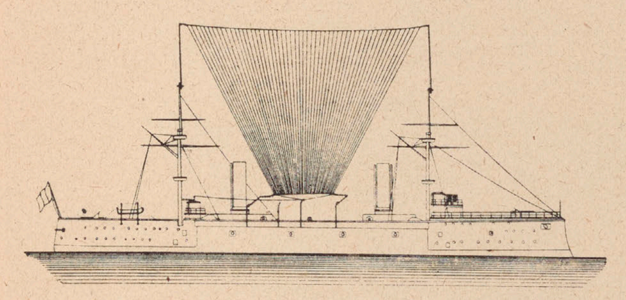


Fig. 171.

Ces stations peuvent se diviser en deux catégories :

Celles qui n'ont qu'à transmettre des télégrammes

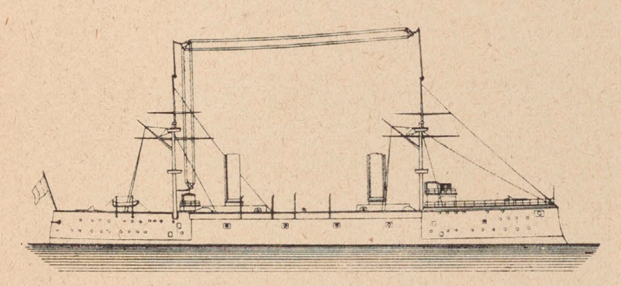


Fig. 172.

aux petites stations normales, et n'en reçoivent pas de celles-ci ;

Celles qui sont destinées à assurer une communication entre deux points très éloignés, c'est-à-dire qui reçoivent et transmettent des télégrammes.

Afin de pouvoir mettre en jeu une énergie considéra-

ble, ces stations emploient de grandes longueurs d'onde, aux environs de 2000 m, et une puissance de 30 à 150 chevaux ou même davantage.

Les antennes, qui doivent avoir une période propre

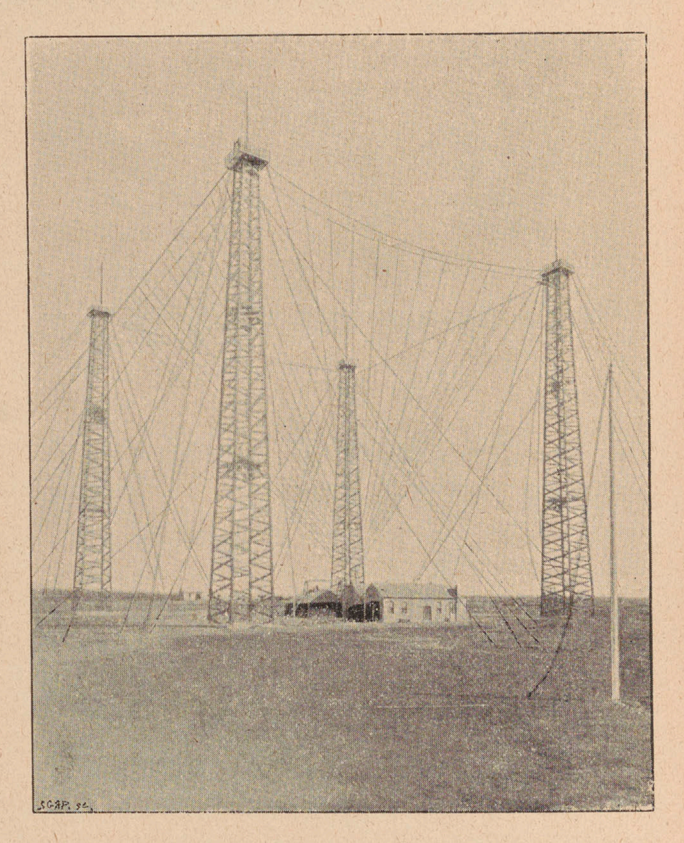


Fig. 173.

voisine de celles des ondes transmises, sont à très grande surface ou grande hauteur.

Les stations puissantes qui furent les premières créées sont celles de Poldhu (Angleterre) et du cap Cod (États-Unis). Elles furent établies par M. Marconi en 1901 pour

essayer de franchir l'Atlantique, mais tous les essais faits jusqu'à ce jour n'ont donné aucun résultat pratique. En revanche, ces deux stations transmettent, parfois jusqu'à 2500 km, des télégrammes de presse aux paquebots ou des télégrammes de service aux navires de guerre anglais.

Les premiers essais de communication à grande distance furent faits avec un navire de guerre italien, le

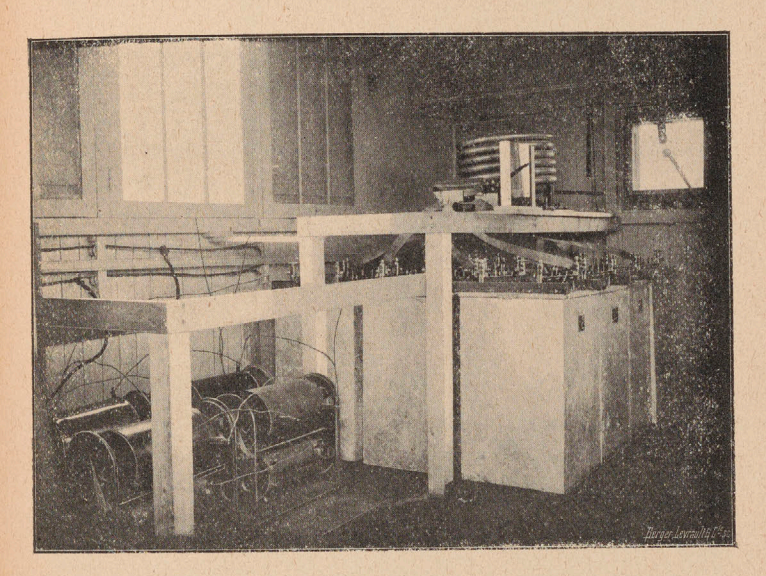


Fig. 174.

Carlo-Alberto (fig. 171 et 172), sur lequel furent installées successivement diverses formes d'antennes, la hauteur étant de 45 m environ. Ce navire parvint à recevoir les télégrammes de Poldhu depuis *Cronstadt* (1700 km) jusqu'à *La Spezzia*. L'emploi du détecteur magnétique donna des résultats très supérieurs à ceux du cohéreur; de plus on observa que la portée était beaucoup plus considérable la nuit que le jour.

Actuellement, la portée est encore augmentée, l'énergie

employée à Poldhu étant de 150 chevaux environ. Une station provisoire française, installée à Bizerte, disposant d'une antenne horizontale de 26 m de hauteur et 300 m de longueur, reçoit sans difficulté, au moyen du détecteur électrolytique, les télégrammes transmis par Poldhu.

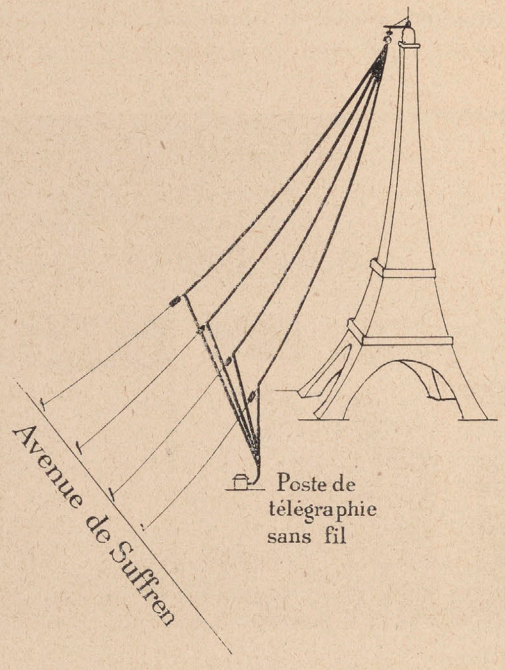


Fig. 175.

On ne possède aucun renseignement précis sur l'organisation des stations Marconi de Poldhu et du cap Cod. La figure 173 représente l'antenne de la station de Poldhu, tout à fait semblable d'ailleurs à celle du cap Cod. Les pylônes supportant l'antenne, en forme de pyramide renversée à base carrée, ont 70 m de hauteur et sont espacés également de 70 m.

En 1903 fut entreprise l'installation provisoire d'une

station à grande portée à la tour Eiffel, pour les besoins de la défense nationale.



Fig. 176.

Cette station peut employer actuellement une énergie maximum de 6 à 7 kilowatts empruntée au secteur d'éclai-

rage de la rive gauche de Paris. Le courant alternatif, fourni à 42 périodes et 220 volts, est transformé à 10 000

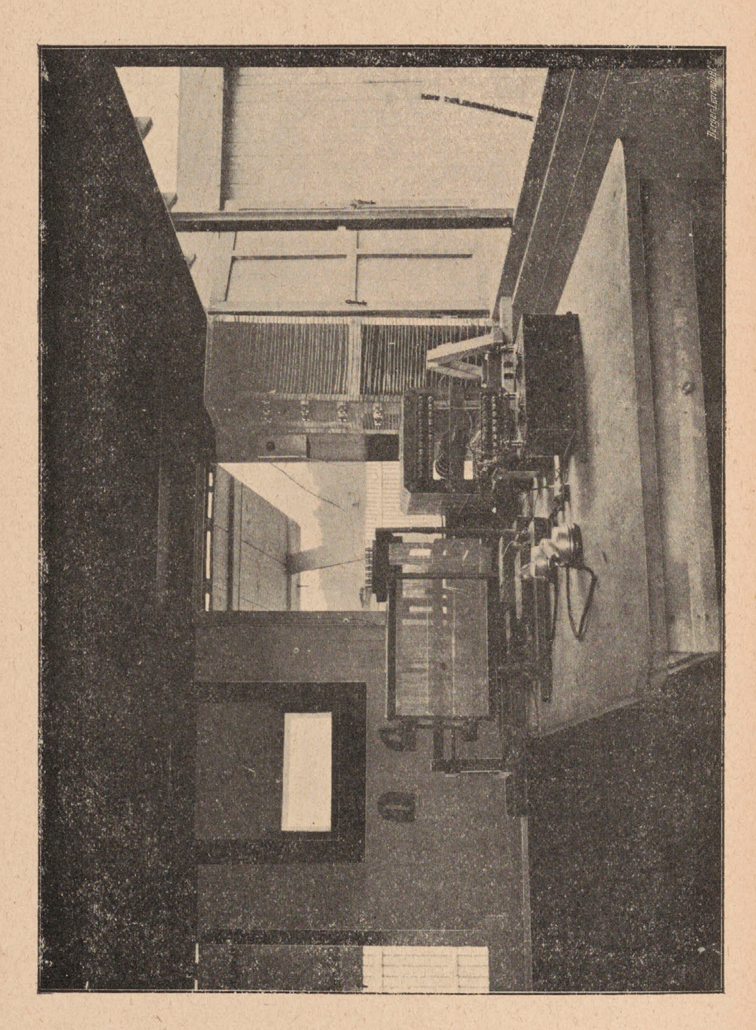


Fig. 177.

volts pour charger une batterie de condensateurs à lames de verre dans le pétrole (fig. 174) de 1 demi-microfarad environ.

L'antenne, dont la forme actuelle est indiquée par la figure 175, est excitée indirectement par un résonateur genre Oudin; la longueur d'onde employée est de 1 800 m environ.

Tous les appareils de transmission sont dans une baraque en planches (fig. 176), les appareils de réception étant dans une autre baraque analogue; l'intérieur de la station est représenté par la figure 177.

Avec cette organisation provisoire et précaire, les télégrammes de la tour sont reçus jusqu'à Bizerte (1 500 km), et la portée limite doit vraisemblablement être encore supérieure. Lorsque l'installation définitive aura été réalisée

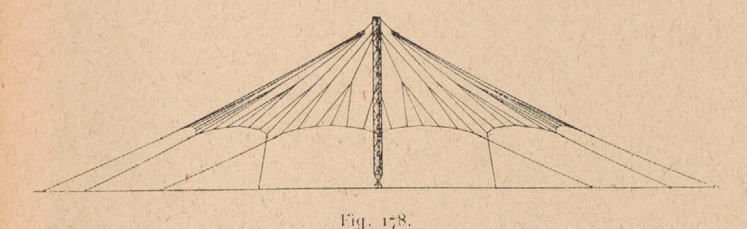


Fig. 178.

et l'énergie utilisée portée seulement à 20 kilowatts, la portée dépassera certainement 3 000 km, grâce à la grande hauteur de la tour. Pour la réception, les perturbations électriques naturelles ne se font pas sentir d'une manière plus gênante avec cette antenne qu'avec celles d'une moindre hauteur et d'une plus grande surface, comme celles de Poldhu, tandis que, pour la transmission, cette grande hauteur constituera toujours un avantage très considérable.

La compagnie Telefunken a créé en 1906 deux stations puissantes en Allemagne, l'une à Norddeich, à l'embouchure de l'Elbe, l'autre à Nauen, près de Berlin.

Aucun renseignement n'a été publié sur la première. Quant à la station de Nauen, elle dispose d'une antenne constituée de la manière suivante (fig. 178 et 179) :

Une tour en fer de forme triangulaire et ayant 100 m

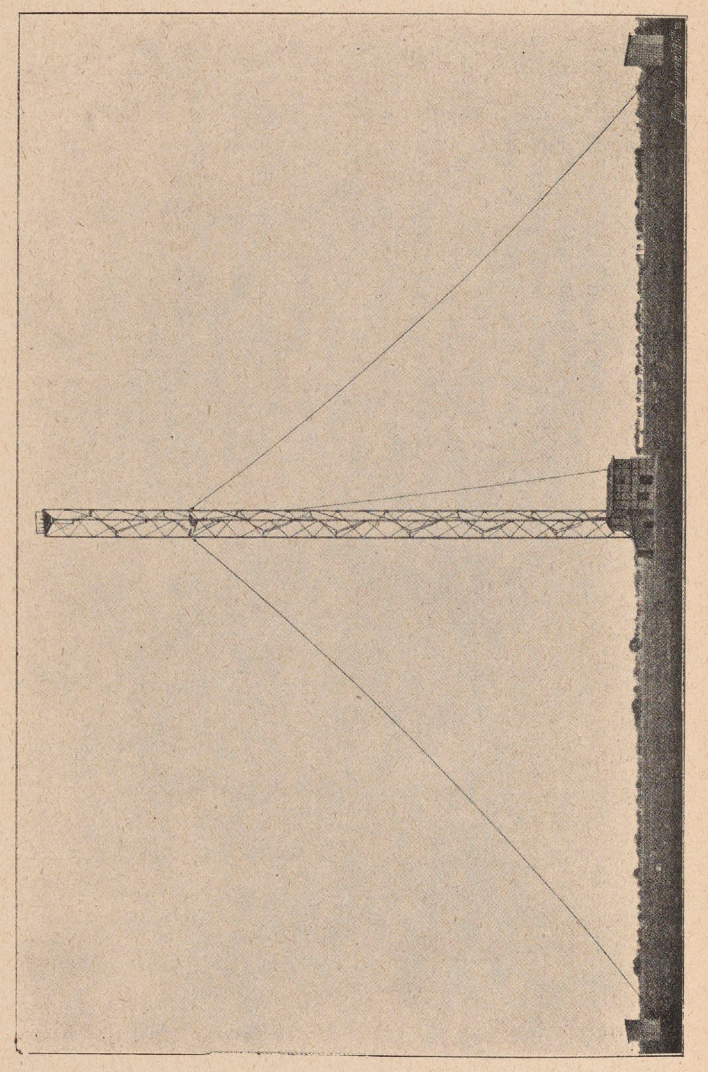


Fig. 179.

de hauteur est posée sur un bloc isolant par l'intermé-

diaire d'une sorte de rotule sphérique. Des haubans isolés, fixés à la tour à une hauteur de 75 m, assurent sa

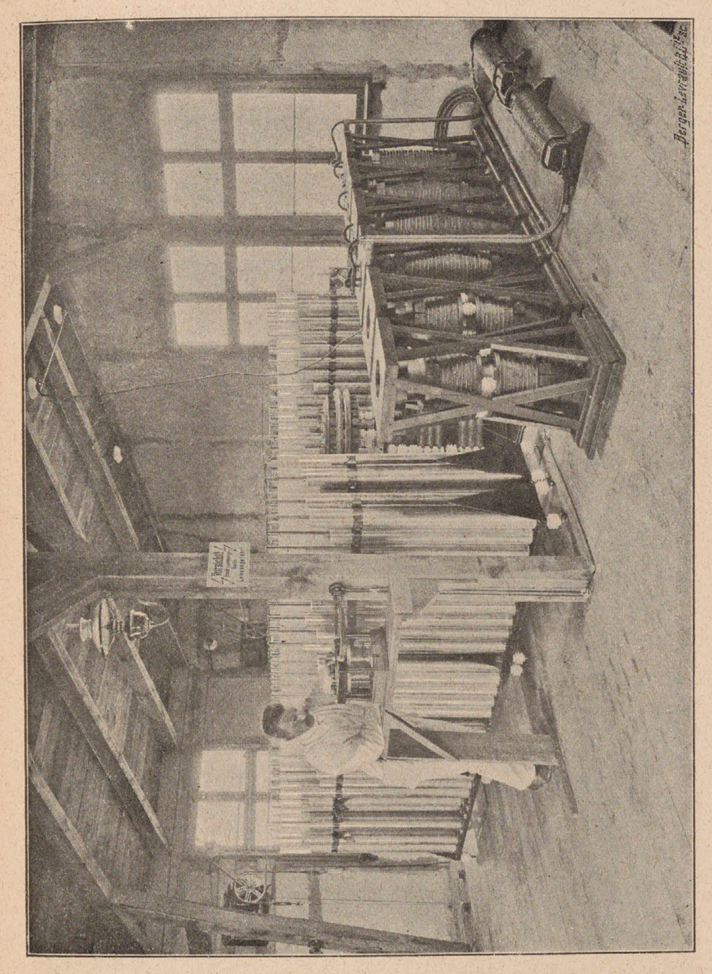


Fig. 180

stabilité. Du sommet partent 54 câbles métalliques qui s'étalent en forme de parapluie et se subdivisent à leur extrémité en 162 câbles fixés au sol par l'intermédiaire de forts isolateurs et de haubans (fig. 178).

L'antenne se compose de la tour elle-même et des câbles rayonnant autour du sommet, lesquels couvrent une surface de 60 000 m².

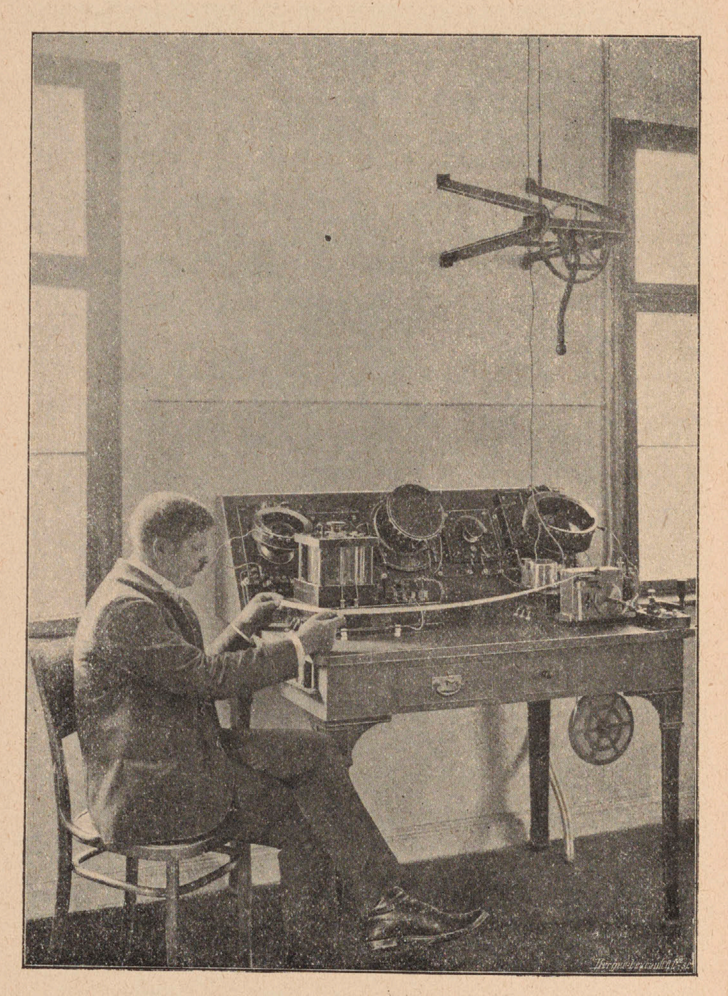


Fig. 181.

La prise de terre se compose de 108 fils noyés dans le sol et se subdivisant encore en 324 fils, couvrant 126 000 m².

La station proprement dite est placée au pied de la tour. Les appareils de transmission, placés à l'étage supérieur, comprennent en particulier une puissante batterie de bouteilles de Leyde (fig. 180), dont la capacité utile est de 1 demi-microfarad environ. Les appareils de réception, comprenant un récepteur à cohéreur et un récepteur électrolytique, sont disposés au rez-de-chaussée (fig. 181). L'énergie nécessaire est fournie par une locomobile de 35-40 chevaux.

La portée de cette station est de 1 500 km environ. En particulier, elle peut correspondre sans difficulté avec la station de la tour Eiffel, située à 1 000 km.

D'autres stations puissantes d'études ont été créées par la compagnie Fessenden à Boston (États-Unis) et à Machrianish (Écosse). Aucun renseignement n'a encore été publié sur ces stations installées en vue d'essayer d'établir une communication par-dessus l'Atlantique. On sait seulement que la station de Machrianish comporte une tour métallique de 150 m de hauteur. La portée de ces stations paraît être au moins égale à celle de Poldhu et du cap Cod.

Enfin, nous citerons encore la station militaire puissante, installée à Vladivostok pendant la guerre russo-japonaise, pour communiquer avec la flotte de secours de l'amiral Rodjestwinski. Parmi les navires de cette flotte, l'un d'eux, l'*Oural,* était aussi muni d'appareils puissants, permettant de communiquer jusqu'à 1 000 km, mais il fut coulé dès le début de la bataille de Tsoushima, sans avoir pu utiliser son installation.

CHAPITRE X

RÉGLEMENTATION DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

CONCLUSIONS

Malgré les perfectionnements apportés depuis ces dernières années aux appareils de production et de réception des ondes hertziennes, on n'a pas réussi à faire disparaître tous les inconvénients que présente la télégraphie sans fil.

Ainsi qu'on l'a vu au cours de cet ouvrage, les nombreuses tentatives faites en vue de réaliser la syntonie n'ont encore donné que des résultats incomplets. Il en résulte qu'une station peut intercepter les dépêches adressées à une autre station, située dans un périmètre assez étendu. Cet inconvénient peut à la vérité être atténué dans une certaine mesure par l'emploi du langage chiffré.

Mais, ce qui est plus grave, la réception d'une dépêche peut être troublée et même empêchée, soit par des signaux parasites envoyés à dessein, soit par les signaux destinés à une station voisine.

Malgré ces inconvénients, la télégraphie sans fil se développe tous les jours : elle est aujourd'hui entrée dans le domaine de la pratique et cette extension rapide doit être attribuée à ce fait que, dans certains cas, la télégraphie sans fil est le seul moyen de communication possible.

Il est bien évident que sur terre, et notamment en Europe, il y aura toujours avantage à employer la télégraphie ordinaire ou la téléphonie, qui, grâce aux perfec-

tionnements apportés aux appareils, assurent un débit que ne permettrait pas la télégraphie sans fil. Nous en exceptons, bien entendu, le cas de guerre, où l'établissement des lignes n'est pas toujours réalisable.

Il n'en est pas de même pour les communications à la mer, soit qu'il s'agisse des relations de navire à navire, soit qu'il s'agisse des relations des navires avec la côte. Dans ce cas, en effet, l'une au moins des stations est mobile, sa position peut être inconnue de la station correspondante et la propagation des ondes dans toutes les directions devient alors un avantage.

C'est, par suite, surtout sur l'établissement des stations destinées aux communications maritimes que s'est porté le développement de la télégraphie sans fil. Mais en raison de leur nombre toujours croissant et des troubles réciproques que peuvent se causer ces stations, on n'a pas tardé à reconnaître la nécessité de réglementer, d'une façon très étroite, l'emploi de la télégraphie sans fil.

C'est dans ce but qu'après une conférence préliminaire tenue à Berlin en 1903, une conférence internationale s'est réunie également à Berlin en 1906. Le résultat de ses travaux a été la rédaction des documents que l'on trouvera ci-après et qui comprennent :

Une convention en date du 3 novembre 1906 avec engagement additionnel et protocole final.

Un règlement de service annexé.

Ces documents ont été signés par les délégués accrédités comme plénipotentiaires de leurs gouvernements respectifs, mais ils ne seront exécutoires qu'à partir du 1er juillet 1908 et après avoir été ratifiés par les États représentés à la conférence. Ils ne constituent d'ailleurs qu'une première approximation et, indépendamment des progrès d'ordre technique qui peuvent être réalisés, la pratique fera certainement reconnaître la nécessité de modifier ou de compléter certaines des dispositions adoptées. Aussi a-t-on prévu pour 1910 la réunion d'une nou-

velle conférence internationale qui se tiendra à Londres, en vue d'élaborer les modifications que l'expérience aura montré la nécessité d'apporter à la réglementation de la télégraphie sans fil.

Ce n'est pas seulement au point de vue international qu'il convient de réglementer la télégraphie sans fil. Dans un même pays, les stations se gênent d'autant plus qu'elles sont plus nombreuses et plus rapprochées. De plus, la facilité avec laquelle peuvent être installés des postes clandestins exige une réglementation sévère et une surveillance incessante. Enfin, les progrès que réalise chaque jour une application scientifique encore peu éloignée de son origine peuvent conduire très rapidement à transformer les installations existantes.

En ce qui concerne la France, ces diverses questions sont soumises à l'examen d'une commission mixte instituée par le décret du 7 mars 1907, dont on trouvera le texte ci-après.

Et maintenant, nous ne pouvons que conclure comme nous l'avons déjà fait dans les précédentes éditions de cet ouvrage. La télégraphie sans fil n'est appelée à faire disparaître aucun des moyens de communication actuellement existants. Dans certains cas, elle en deviendra un auxiliaire précieux, dans d'autres elle comblera des lacunes en permettant d'établir des relations impossibles avant elle. En particulier, elle contribuera à augmenter dans une très large mesure la sécurité de la navigation.

ANNEXES

I

Convention radiotélégraphique internationale conclue entre l'Allemagne, les États-Unis d'Amérique, l'Argentine, l'Autriche, la Hongrie, la Belgique, le Brésil, la Bulgarie, le Chili, le Danemark, l'Espagne, la France, la Grande-Bretagne, la Grèce, l'Italie, le Japon, le Mexique, Monaco, la Norvège, les Pays-Bas, la Perse, le Portugal, la Roumanie, la Russie, la Suède, la Turquie et l'Uruguay

Les soussignés, plénipotentiaires des gouvernements des pays ci-dessus énumérés, s'étant réunis en conférence à Berlin, ont, d'un commun accord et sous réserve de ratification, arrêté la convention suivante :

Art. 1. — Les hautes parties contractantes s'engagent à appliquer les dispositions de la présente convention dans toutes les stations radiotélégraphiques — stations côtières et stations de bord — ouvertes au service de la correspondance publique entre la terre et les navires en mer qui sont établies ou exploitées par les parties contractantes.

Elles s'engagent en outre à imposer l'observation de ces dispositions aux exploitations privées autorisées soit à établir ou à exploiter des stations côtières radiotélégraphiques ouvertes au service de la correspondance publique entre la terre et les navires en mer, soit à établir ou à exploiter des stations radiotélégraphiques ouvertes ou non au service de la correspondance publique à bord des navires qui portent leur pavillon.

Art. 2. — Est appelée station côtière toute station radiotélégraphique établie sur terre ferme ou à bord d'un navire ancré à demeure et utilisée pour l'échange de la correspondance avec les navires en mer.

Toute station radiotélégraphique établie sur un navire autre qu'un bateau fixe est appelée station de bord.

Art. 3. — Les stations côtières et les stations de bord sont tenues d'échanger réciproquement les radiotélégrammes sans distinction du système radiotélégraphique adopté par ces stations.

Art. 4 — Nonobstant les dispositions de l'article 3, une station peut être affectée à un service de correspondance publique restreinte déterminé par le but de la correspondance ou par d'autres circonstances indépendantes du système employé.

Art. 5. — Chacune des hautes parties contractantes s'engage à faire relier les stations côtières au réseau télégraphique par des fils spéciaux ou tout au moins à prendre d'autres mesures assurant un échange rapide entre les stations côtières et le réseau télégraphique.

Art. 6. — Les hautes parties contractantes se donnent mutuellement connaissance des noms des stations côtières et des stations de bord visées à l'article 1, ainsi que de toutes les indications propres à faciliter et à accélérer les échanges radiotélégraphiques, qui seront spécifiées dans le règlement.

Art. 7. — Chacune des hautes parties contractantes se réserve la faculté de prescrire ou d'admettre que dans les stations visées à l'article 1, indépendamment de l'installation dont les indications sont publiées conformément à l'article 6, d'autres dispositifs soient établis et exploités en vue d'une transmission radiotélégraphique spéciale sans que les détails de ces dispositifs soient publiés.

Art. 8. — L'exploitation des stations radiotélégraphiques est organisée, autant que possible, de manière à ne pas troubler le service d'autres stations de l'espèce.

Art. 9. — Les stations radiotélégraphiques sont obligées d'accepter par priorité absolue les appels de détresse provenant des navires, de répondre de même à ces appels et d'y donner la suite qu'ils comportent.

Art. 10. — La taxe totale des radiotélégrammes comprend :

1° La taxe afférente au parcours maritime, savoir :

a) la « taxe côtière » qui appartient à la station côtière ;

b) la « taxe de bord » qui appartient à la station de bord.

2° La taxe pour la transmission sur les lignes du réseau télégraphique calculée d'après les règles générales.

Le taux de la taxe côtière est soumis à l'approbation du gouvernement dont relève la station côtière ; celui de la taxe de bord, à l'approbation du gouvernement dont le navire porte le pavillon.

Chacune de ces deux taxes doit être fixée suivant le tarif par mot pur et simple, avec minimum facultatif de taxe par télégramme, sur la base de la rémunération équitable du travail radiotélégraphique. Chacune d'elles ne peut dépasser un maximum à fixer par les hautes parties contractantes.

Toutefois, chacune des hautes parties contractantes a la faculté d'autoriser des taxes supérieures à ce maximum dans le cas de stations d'une portée dépassant 800 kilomètres, ou de stations exceptionnellement onéreuses en raison des conditions matérielles de leur installation et de leur exploitation.

Pour les radiotélégrammes originaires ou à destination d'un pays et échangés directement avec les stations côtières de ce pays, les hautes parties contractantes se donnent mutuellement connaissance des taxes applicables à la transmission sur les lignes de leurs réseaux télégraphiques. Ces taxes sont celles qui résultent du principe que la station côtière doit être considérée comme station d'origine ou de destination.

Art. 11. — Les dispositions de la présente convention sont complétées par un règlement qui a la même valeur et entre en vigueur en même temps que la convention.

Les prescriptions de la présente convention et du règlement y relatif peuvent être à toute époque modifiées d'un commun accord par les hautes parties contractantes. Des conférences de plénipotentiaires ou de simples conférences administratives, selon qu'il s'agira de la convention ou du règlement, auront lieu périodiquement ; chaque conférence fixera elle-même le lieu et l'époque de la réunion suivante.

Art. 12. — Ces conférences sont composées de délégués des gouvernements des pays contractants.

Dans les délibérations, chaque pays dispose d'une seule voix.

Si un gouvernement adhère à la convention pour ses colonies, possessions ou protectorats, les conférences ultérieures peuvent décider que l'ensemble ou une partie de ces colonies, possessions ou protectorats est considéré comme formant un pays pour l'application de l'alinéa précédent. Toutefois, le nombre des voix dont dispose un gouvernement, y compris ses colonies, possessions ou protectorats, ne peut dépasser six.

Art. 13. — Un bureau international est chargé de réunir, de coordonner et de publier les renseignements de toute

nature relatifs à la radiotélégraphie, d'instruire les demandes de modifications à la convention et au règlement, de faire promulguer les changements adoptés et, en général, de procéder à tous travaux administratifs dont il serait saisi dans l'intérêt de la radiotélégraphie internationale.

Les frais de cette institution sont supportés par tous les pays contractants.

Art. 14. — Chacune des hautes parties contractantes se réserve la faculté de fixer les conditions dans lesquelles elle admet les radiotélégrammes en provenance ou à destination d'une station, soit de bord, soit côtière, qui n'est pas soumise aux dispositions de la présente convention.

Si un radiotélégramme est admis, les taxes ordinaires doivent lui être appliquées.

Il est donné cours à tout radiotélégramme provenant d'une station de bord et reçu par une station côtière d'un pays contractant ou accepté en transit par l'administration d'un pays contractant.

Il est également donné cours à tout radiotélégramme à destination d'un navire, si l'administration d'un pays contractant en a accepté le dépôt ou si l'administration d'un pays contractant l'a accepté en transit d'un pays non contractant, sous réserve du droit de la station côtière de refuser la transmission à une station de bord relevant d'un pays non contractant.

Art. 15. — Les dispositions des articles 8 et 9 de cette convention sont également applicables aux installations radiotélégraphiques autres que celles visées à l'article 1.

Art. 16. — Les gouvernements qui n'ont point pris part à la présente convention sont admis à y adhérer sur leur demande.

Cette adhésion est notifiée par la voie diplomatique à celui des gouvernements contractants au sein duquel la dernière conférence a été tenue, et par celui-ci à tous les autres.

Elle emporte, de plein droit, accession à toutes les clauses de la présente convention et admission à tous les avantages y stipulés.

Art. 17. — Les dispositions des articles 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 12 et 17 de la convention télégraphique internationale de Saint-Pétersbourg, du 10/22 juillet 1875, sont applicables à la radiotélégraphie internationale.

Art. 18. — En cas de dissentiment entre deux ou plusieurs gouvernements contractants relativement à l'interprétation ou à l'exécution soit de la présente convention, soit du règlement prévu par l'article 11, la question en litige peut, d'un commun accord, être soumise à un jugement arbitral. Dans ce cas, chacun des gouvernements en cause en choisit un autre non intéressé dans la question.

La décision des arbitres est prise à la majorité absolue des voix.

En cas de partage des voix, les arbitres choisissent, pour trancher le différend, un autre gouvernement contractant, également désintéressé dans le litige. A défaut d'une entente concernant ce choix, chaque arbitre propose un gouvernement contractant désintéressé. Il est tiré au sort entre les gouvernements proposés. Le tirage au sort appartient au gouvernement sur le territoire duquel fonctionne le bureau international prévu à l'article 13.

Art. 19. — Les hautes parties contractantes s'engagent à prendre, ou à proposer à leurs législatures respectives, les mesures nécessaires pour assurer l'exécution de la présente convention.

Art. 20. — Les hautes parties contractantes se communiqueront les lois qui auraient déjà été rendues ou qui viendraient à l'être dans leurs pays, relativement à l'objet de la présente convention.

Art. 21. — Les hautes parties contractantes conservent leur entière liberté relativement aux installations radiotélégraphiques non prévues à l'article 1 et *notamment aux installations navales et militaires,* lesquelles restent soumises uniquement aux obligations prévues aux articles 8 et 9 de la présente convention.

Toutefois, lorsque ces installations font de la correspondance publique, elles se conforment, pour l'exécution de ce service, aux prescriptions du règlement en ce qui concerne le mode de transmission et la comptabilité.

Art. 22. — La présente convention sera mise à exécution à partir du 1er juillet 1908 et demeurera en vigueur pendant un temps indéterminé et jusqu'à l'expiration d'une année à partir du jour où la dénonciation en sera faite.

La dénonciation ne produit son effet qu'à l'égard du gou-

vernement au nom duquel elle a été faite. Pour les autres parties contractantes, la convention reste en vigueur.

Art. 23. — La présente convention sera ratifiée et les ratifications en seront déposées à Berlin dans le plus bref délai possible.

En foi de quoi, les plénipotentiaires respectifs ont signé la convention en un exemplaire qui restera déposé aux archives du gouvernement impérial d'Allemagne et dont une copie sera remise à chaque partie.

Fait à Berlin, le 3 novembre 1906.

Pour l'Allemagne : Kraetke, Sydow. — *Pour les États-Unis d'Amérique :* Charlemagne Tower, H. N. Manney, James Allen, John I. Waterbury. — *Pour l'Argentine :* J. Olmi. — *Pour l'Autriche :* Barth, Fries. — *Pour la Hongrie :* Pierre de Szalay, Dr de Hennyey, Hollós. — *Pour la Belgique :* F. Delarge, E. Buels. — *Pour le Brésil :* César de Campos. — *Pour la Bulgarie :* Iv. Stoyanovitch. — *Pour le Chili :* J. Munoz Hurtado, J. Mery. — *Pour le Danemark :* N. R. Meyer, I. A. Voehtz. — *Pour l'Espagne :* Ignacio Murcia, Ramon Estrada, Rafael Ravena, Isidoro Calvo, Manuel Noriega, Antonio Pelaez Campomanes. — *Pour la France :* J. Bordelongue, L. Gaschard, Boulanger, Devos. — *Pour la Grande-Bretagne :* H. Babington Smith, A. E. Bethell. R. L. Hippisley. — *Pour la Grèce :* T. Argyropoulos. — *Pour l'Italie :* J. Colombo. — *Pour le Japon :* Osuke Asano, Rokure Yashiro, Shunkichi Kimura, Ziro Tanaka, Saburo Kyakutake. — *Pour le Mexique :* José M. Perez. — *Pour Monaco :* J. Depelley. — *Pour la Norvège :* Heftye, O. T. Eidem. — *Pour les Pays-Bas :* Kruyt, Perk, Hoven. — *Pour la Perse :* Hovhannés Khan. — *Pour le Portugal :* Paulo Benjamin Cabral. — *Pour la Roumanie :* Gr. Cerkez. — *Pour la Russie :* A. Eichholz, A. Euler, Victor Bilibine, A. Renimert, W. Kedrine. — *Pour la Suède :* Herman Rydin, A. Hamilton. — *Pour la Turquie :* Nazif Bey. — *Pour l'Uruguay :* F. A. Costanzo.

II

Engagement additionnel

Les soussignés, plénipotentiaires des gouvernements de l'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, de l'Argentine, de l'Autriche, de la Hongrie, de la Belgique, du Brésil, de la Bulgarie, du Chili, du Danemark, de l'Espagne, de la France, de la Grèce, de Monaco, de la Norvège, des Pays-Bas, de la Roumanie, de la Russie, de la Suède, de la Turquie, de l'Uruguay, s'engagent à appliquer à partir de la date de la mise en vigueur de la convention les dispositions des articles additionnels suivants :

I. — Chaque station de bord visée à l'article 1 de la convention sera tenue d'intercommuniquer avec toute autre station de bord sans distinction du système radiotélégraphique adopté respectivement par ces stations.

II. — Les gouvernements qui n'ont pas adhéré à l'article ci-dessus peuvent, à toute époque, faire connaître, en adoptant la procédure indiquée à l'article 16 de la convention, qu'ils s'engagent à en appliquer les dispositions.

Ceux qui ont adhéré à l'article ci-dessus peuvent, à toute époque, faire connaître, dans les conditions prévues à l'article 22 de la convention, leur intention de cesser d'en appliquer les dispositions.

III. — Le présent engagement sera ratifié et les ratifications en seront déposées à Berlin dans le plus bref délai possible.

En foi de quoi les plénipotentiaires respectifs ont signé le présent engagement en un exemplaire qui restera déposé aux archives du gouvernement impérial d'Allemagne et dont une copie sera remise à chaque partie.

Fait à Berlin, le 3 novembre 1906.

III

Protocole final

Au moment de procéder à la signature de la convention arrêtée par la conférence radiotélégraphique internationale de Berlin, les plénipotentiaires soussignés sont convenus de ce qui suit :

I. — Les hautes parties contractantes conviennent qu'à la conférence prochaine le nombre des voix dont chaque pays dispose (article 12 de la convention) sera décidé au début des délibérations de manière que les colonies, possessions ou protectorats admis à bénéficier de voix puissent exercer leur droit de vote au cours de tous les travaux de cette conférence.

La décision prise aura un effet immédiat et restera en vigueur jusqu'à sa modification par une conférence ultérieure.

En ce qui concerne la prochaine conférence, les demandes tendant à l'admission de nouvelles voix en faveur de colonies, possessions ou protectorats qui auraient adhéré à la convention seront adressées au bureau international six mois au moins avant la date de la réunion de cette conférence. Ces demandes seront immédiatement notifiées aux autres gouvernements contractants qui pourront, dans un délai de deux mois, à partir de la remise de la notification, formuler des demandes semblables.

II. — Chaque gouvernement contractant peut se réserver la faculté de désigner, suivant les circonstances, certaines stations côtières qui seront exemptées de l'obligation imposée par l'article 3 de la convention, sous la condition que, dès l'application de cette mesure, il soit ouvert sur son territoire une ou plusieurs stations soumises aux obligations de l'article 3 et assurant le service radiographique dans la région desservie par les stations exemptées, d'une manière satisfaisant aux besoins de la correspondance publique. Les gouvernements qui désirent se réserver cette faculté doivent en donner notification dans la forme prévue au deuxième alinéa

de l'article 16 de la convention, au plus tard trois mois avant la mise en vigueur de la convention ou, dans le cas d'adhésions ultérieures, au moment de l'adhésion.

Les pays dont les noms suivent déclarent, dès à présent, qu'il ne se réserveront pas cette faculté : Allemagne ; États-Unis d'Amérique ; Argentine ; Autriche ; Hongrie ; Belgique ; Brésil ; Bulgarie ; Chili ; Grèce ; Mexique ; Monaco ; Norvège ; Pays-Bas ; Roumanie ; Russie ; Suède ; Uruguay.

III. — Le mode d'exécution des dispositions de l'article précédent dépend du gouvernement qui se sert de la faculté d'exemption : ce gouvernement a la pleine liberté de décider de temps en temps, suivant son propre jugement, combien de stations et quelles stations seront exemptées. Ce gouvernement a la même liberté en ce qui concerne le mode d'exécution de la condition relative à l'ouverture d'autres stations soumises aux obligations de l'article 3 et assurant le service radiotélégraphique dans la région desservie par les stations exemptées, d'une manière satisfaisant aux besoins de la correspondance publique.

IV. — Il est entendu qu'afin de ne pas entraver les progrès scientifiques, les dispositions de l'article 3 de la convention n'empêchent pas l'emploi éventuel d'un système radiotélégraphique incapable de communiquer avec d'autres systèmes, pourvu toutefois que cette incapacité soit due à la nature spécifique de ce système et qu'elle ne soit pas l'effet de dispositifs adoptés uniquement en vue d'empêcher l'intercommunication.

V. — L'adhésion à la convention par le gouvernement d'un pays ayant des colonies, possessions ou protectorats ne comporte pas l'adhésion de ses colonies, possessions ou protectorats, à moins d'une déclaration à cet effet de la part de ce gouvernement. L'ensemble de ces colonies, possessions et protectorats ou chacun d'eux séparément peut faire l'objet d'une adhésion distincte ou d'une dénonciation distincte dans les conditions prévues aux articles 16 et 22 de la convention.

Il est entendu que les stations à bord de navires ayant leur port d'attache dans une colonie, possession ou protectorat peuvent être désignées comme relevant de l'autorité de cette colonie, possession ou protectorat.

VI. — Il est pris acte de la déclaration suivante :

La délégation italienne, en signant la convention, doit toute-

fois faire la réserve que la convention ne pourra être ratifiée de la part de l'Italie qu'à la date de l'expiration de ses contrats avec M. Marconi et sa compagnie, ou à une date plus rapprochée si le gouvernement du roi d'Italie peut la fixer par des négociations avec M. Marconi et sa compagnie.

VII. — Dans le cas où une ou plusieurs des parties contractantes ne ratifieraient pas la convention, celle-ci n'en sera pas moins valable pour les États qui l'auront ratifiée.

En foi de quoi, les plénipotentiaires ci-dessous ont dressé le présent protocole final, qui aura la même force et la même valeur que si ses dispositions étaient insérées dans le texte même de la convention à laquelle il se rapporte, et ils l'ont signé en un exemplaire qui restera déposé aux archives du gouvernement impérial d'Allemagne et dont une copie sera remise à chaque partie.

Fait à Berlin, le 3 novembre 1906.

IV

Règlement de service annexé à la convention radiotélégraphique internationale

1. Organisation des stations radiotélégraphiques

I. — Le choix des appareils et des dispositifs radiotélégraphiques à employer par les stations côtières et les stations de bord est libre. L'installation de ces stations doit répondre, autant que possible, aux progrès scientifiques et techniques.

II. — Deux longueurs d'onde, l'une de 300 et l'autre de 600 m, sont admises pour le service de la correspondance publique générale. Toute station côtière ouverte à ce service utilise l'une ou l'autre de ces deux longueurs d'onde. Pendant toute la durée de son ouverture au service, chaque station doit être en état de recevoir les appels faits au moyen de sa longueur d'onde, et il n'y peut être fait usage d'aucune autre longueur d'onde pour le service de la correspondance publique générale. Toutefois, chaque gouvernement peut autoriser l'emploi dans une station côtière d'autres longueurs d'onde destinées à assurer un service de longue portée ou un service autre que celui de la correspondance publique générale et établi conformément aux dispositions de la convention, à condition que ces longueurs d'onde ne dépassent pas 600 m, ou qu'elles soient supérieures à 1 600 m.

III. — 1. La longueur d'onde normale pour les stations de bord est de 300 m. Toute station de bord doit être installée de manière à pouvoir se servir de cette longueur d'onde. D'autres longueurs d'onde peuvent être employées par ces stations à condition de ne pas dépasser 600 m.

2. Les navires de faible tonnage qui seraient dans l'impossibilité matérielle de réaliser le dispositif assurant la longueur d'onde de 300 m peuvent être autorisés à employer une longueur d'onde inférieure.

IV. — *a*) Il est procédé, par les soins du bureau international, à l'établissement d'une nomenclature des stations

radiotélégraphiques, visées à l'article 1 de la convention. Cette nomenclature donne pour chaque station les renseignements suivants :

1° Nom, nationalité et position géographique pour les stations côtières; nom, nationalité, signal distinctif du code international et indication du port d'attache du navire, pour les stations de bord;

2° Indicatif d'appel (les indicatifs doivent être différenciés les uns des autres et chacun doit être formé d'un groupe de trois lettres);

3° Portée normale;

4° Système radiotélégraphique;

5° Catégorie des appareils récepteurs (appareils écrivants, à réception auditive ou autres);

6° Longueurs d'onde utilisées par la station (la longueur d'onde normale est soulignée);

7° Nature du service effectué par la station :

Correspondance publique générale;

Correspondance publique restreinte (correspondance avec les navires... ; correspondance avec les lignes de navigation de.... ; correspondance avec les navires munis d'appareils du système... etc.);

Correspondance publique de longue portée;

Correspondance d'intérêt privé;

Correspondance spéciale (correspondance exclusivement officielle), etc. ;

8° Heures d'ouverture;

9° Taxes côtière ou de bord.

b) Sont compris, en outre, dans la nomenclature, les renseignements relatifs aux stations radiotélégraphiques autres que celles visées à l'article 1 de la convention, qui sont communiqués au bureau international par l'administration dont dépendent ces stations.

V. — L'échange de signaux et de mots superflus est interdit aux stations visées à l'article 1 de la convention. Des essais et des exercices ne sont tolérés dans ces stations qu'autant qu'ils ne troublent point le service d'autres stations.

VI. — 1. Aucune station de bord ne peut être établie ou exploitée par une entreprise privée sans autorisation du gouvernement dont dépend le navire. Cette autorisation fait l'objet d'une licence délivrée par ce gouvernement.

2. Toute station de bord autorisée doit satisfaire aux conditions suivantes :

a) Le système employé doit être un système syntonisé ;

b) La vitesse de transmission et de réception, dans les circonstances normales, ne doit pas être inférieure à douze mots par minute, le mot étant compté à raison de cinq lettres ;

c) La puissance transmise à l'appareil radiotélégraphique ne doit pas, dans les circonstances normales, dépasser 1 kilowatt. Une puissance supérieure à 1 kilowatt peut être employée si le navire se trouve dans la nécessité de correspondre à une distance de plus de 300 km de la station côtière la plus rapprochée, ou si, par suite d'obstacles, la communication ne peut être réalisée qu'au moyen d'une augmentation de puissance.

3. Le service de la station de bord doit être assuré par un télégraphiste possesseur d'un certificat délivré par le gouvernement dont dépend le navire. Ce certificat constate la valeur professionnelle du télégraphiste en ce qui concerne :

a) Le réglage des appareils ;

b) La transmission et la réception auditive à une vitesse qui ne doit pas être inférieure à vingt mots par minute ;

c) La connaissance des règlements applicables à l'échange des communications radiotélégraphiques.

4. En outre, le certificat constate que le gouvernement a soumis le télégraphiste à l'obligation du secret des correspondances.

VII. — 1. Si une administration a connaissance d'une infraction à la convention ou au règlement commise dans une des stations qu'elle a autorisées, elle constate les faits et fixe les responsabilités.

En ce qui concerne les stations de bord, si la responsabilité incombe au télégraphiste, l'administration prend les mesures nécessaires et, le cas échéant, retire le certificat. S'il est constaté que l'infraction résulte de l'état des appareils ou d'instructions données au télégraphiste, il est procédé de même à l'égard de la licence accordée au navire.

2. Dans le cas d'infractions réitérées à la charge du même navire, si les représentations faites à l'administration dont dépend le navire par une autre administration restent sans effet, celle-ci a la faculté, après en avoir donné avis, d'autoriser ses stations côtières à ne pas accepter les communications provenant du navire en cause. En cas de différend entre les

deux administrations, la question est soumise à un jugement arbitral, à la demande de l'un des gouvernements en cause. La procédure est celle indiquée à l'article 18 de la convention.

2. Durée du service des stations côtières

VIII. — 1. Le service des stations côtières est, autant que possible, permanent, le jour et la nuit, sans interruption.

Toutefois, certaines stations côtières peuvent avoir un service de durée limitée. Chaque administration fixe les heures de service.

2. Les stations côtières dont le service n'est point permanent ne peuvent prendre clôture avant d'avoir transmis tous leurs radiotélégrammes aux navires qui se trouvent dans leur rayon d'action et d'avoir reçu de ces navires tous les radiotélégrammes annoncés. Cette disposition est également applicable lorsque des navires signalent leur présence avant la cessation effective du travail.

3. Rédaction et dépôt des radiotélégrammes

IX. — Si le parcours d'un radiotélégramme s'effectue en partie sur des lignes télégraphiques ou par des stations radiotélégraphiques relevant d'un gouvernement non contractant, il peut être donné cours à ce radiotélégramme, sous la réserve tout au moins que les administrations dont dépendent ces lignes ou ces stations aient déclaré vouloir appliquer, le cas échéant, les dispositions de la convention et du règlement qui sont indispensables pour l'acheminement régulier des radiotélégrammes, et que la comptabilité soit assurée.

X. — 1. Les radiotélégrammes portent en préambule la mention de service « Radio ».

2. Dans la transmission des radiotélégrammes des stations de bord aux stations côtières, il est fait abstraction, dans le préambule, de la date et de l'heure de dépôt.

A la réexpédition sur le réseau télégraphique, la station côtière inscrit, comme indication du bureau d'origine, son nom suivi de celui du navire et elle donne, comme heure de dépôt, l'heure de réception.

XI. — L'adresse des radiotélégrammes destinés aux navires en mer doit être aussi complète que possible. Elle est obligatoirement libellée comme il suit :

a) Nom du destinataire, avec indication complémentaire s'il y a lieu ;

b) Nom du navire, tel qu'il figure à la nomenclature, complété par la nationalité et au besoin par le signal distinctif du code international, en cas d'homonymie ;

c) Nom de la station côtière, tel qu'il figure à la nomenclature.

4. Taxation

XII. — La taxe côtière ne peut dépasser 60 cent. par mot, celle de bord 40 cent. par mot.

Un minimum de taxe, qui ne peut dépasser la taxe côtière ou de bord d'un radiotélégramme de dix mots, peut être imposé en ce qui concerne les taxes côtière ou de bord.

XIII. — Le pays sur le territoire duquel est établie une station côtière servant d'intermédiaire pour l'échange de radiotélégrammes entre une station de bord et un autre pays est considéré, en ce qui concerne l'application des taxes télégraphiques, comme pays de provenance ou de destination de ces radiotélégrammes et non comme pays de transit.

5. Perception des taxes

XIV. — La taxe totale des radiotélégrammes est perçue sur l'expéditeur.

Les stations de bord doivent posséder à cet effet les tarifs utiles. Elles ont toutefois la faculté de se renseigner auprès des stations côtières au sujet de la taxation de radiotélégrammes pour lesquels elles ne possèdent pas toutes les données nécessaires.

6. Transmission des radiotélégrammes

a) *Signaux de transmission*

XV. — Les signaux employés sont ceux du code Morse international.

XVI. — Les navires en détresse font usage du signal suivant :

· · · — — — · · ·

répété à de courts intervalles.

Dès qu'une station perçoit le signal de détresse, elle doit suspendre toute correspondance et ne la reprendre qu'après avoir acquis la certitude que la communication motivée par l'appel de secours est terminée.

Dans le cas où le navire en détresse ajoute à la fin de la série de ses appels de secours l'indicatif d'appel d'une station déterminée, la réponse à l'appel n'appartient qu'à cette station. A défaut de l'indication d'une station déterminée dans l'appel de secours, chaque station qui perçoit cet appel est tenue d'y répondre.

XVII. — 1. L'indicatif d'appel, suivi des lettres · — — · · — · — · · · « P R B », signifie que le navire ou la station faisant l'appel désire communiquer avec la station appelée à l'aide du code international de signaux.

La combinaison des lettres P R B est interdite, comme indication de service, pour tout autre objet que celui indiqué ci-dessus.

2. Les radiotélégrammes peuvent être rédigés à l'aide du code international de signaux.

Ceux qui sont adressés à une station radiotélégraphique en vue d'une transmission ultérieure ne sont pas traduits par cette station.

b) *Ordre de transmission*

XVIII. — Entre deux stations, les radiotélégrammes de même rang sont transmis isolément dans l'ordre alternatif ou par séries de plusieurs radiotélégrammes suivant l'indication de la station côtière, à la condition que la durée de la transmission de chaque série ne dépasse pas vingt minutes.

c) *Appel des stations radiotélégraphiques et transmission des radiotélégrammes*

XIX. — 1. En règle générale, c'est la station de bord qui appelle la station côtière.

2. L'appel ne peut être fait, en règle générale, que lorsque

le navire se trouve à une distance de la station côtière inférieure à 75 % de la portée normale de cette dernière.

3. Avant de procéder à un appel, la station de bord doit régler le plus sensiblement possible son système récepteur et s'assurer que la station côtière qu'elle veut appeler n'est pas en communication. Si elle constate qu'une transmission est en cours, elle attend la première suspension.

4. La station de bord fait emploi, pour l'appel, de l'onde normale de la station côtière.

5. Si, malgré ces précautions, un échange radiotélégraphique public est entravé, l'appel doit cesser à la première demande d'une station côtière ouverte à la correspondance publique. Cette station doit alors indiquer la durée approximative de l'attente.

XX. — 1. L'appel comporte le signal — • — • —, l'indicatif répété trois fois de la station appelée, le mot « de » suivi de l'indicatif de la station expéditrice répété trois fois ;

2. La station appelée répond en donnant le signal — • — • —, suivi de l'indicatif répété trois fois de la station correspondante, du mot « de », de son indicatif et du signal — • —.

XXI. — Si une station appelée ne répond pas à la suite de l'appel (article XX) répété trois fois à des intervalles de deux minutes, l'appel ne peut être repris qu'après un intervalle d'une demi-heure, la station faisant l'appel s'étant d'abord assurée qu'aucune communication radiotélégraphique n'est en cours.

XXII. — Aussitôt que la station côtière a répondu, la station de bord fait connaître :

a) La distance du navire à la station côtière en milles nautiques ;

b) Le relèvement vrai en degrés, comptés de 0 à 360 ;

c) La route vraie en degrés, comptés de 0 à 360 ;

d) La vitesse en milles nautiques ;

e) Le nombre de mots qu'elle a à transmettre.

La station côtière répond en indiquant le nombre de mots à transmettre au navire.

Si la transmission ne peut avoir lieu immédiatement, la station côtière fait connaître à la station de bord la durée approximative de l'attente.

XXIII. — Lorsqu'une station côtière est saisie d'appels provenant de plusieurs stations de bord, la station côtière

décide de l'ordre dans lequel les stations de bord seront admises à échanger leurs correspondances.

Pour régler cet ordre, la station côtière s'inspire uniquement de la nécessité de permettre à toute station intéressée d'échanger le plus grand nombre possible de radiotélégrammes.

XXIV. — Avant de commencer l'échange de la correspondance, la station côtière fait connaître à la station de bord si la transmission doit s'effectuer dans l'ordre alternatif ou par séries (article XVIII) ; elle commence ensuite la transmission ou fait suivre ces indications du signal — · — (invitation à transmettre).

XXV. — La transmission du radiotélégramme est précédée du signal — · — · — et terminée par le signal · — · — · suivi de l'indicatif de la station expéditrice.

XXVI. — Lorsque le télégramme à transmettre contient plus de quarante mots, la station expéditrice interrompt la transmission après chaque série de vingt mots environ par un point d'interrogation · · — — · ·, et elle ne reprend la transmission qu'après avoir obtenu de la station correspondante la répétition du dernier mot bien reçu suivi d'un point d'interrogation.

Dans le cas de transmission par séries, l'accusé de réception est donné après chaque radiotélégramme.

XXVII. — 1. Lorsque les signaux deviennent douteux, il importe d'avoir recours à toutes les ressources possibles pour l'achèvement de la transmission. A cet effet, le télégramme est répété, à la demande de la station réceptrice, sans toutefois dépasser trois répétitions. Si, malgré cette triple transmission, les signaux sont toujours illisibles, le radiotélégramme est annulé. Si l'accusé de réception n'est pas reçu, la station transmettrice appelle de nouveau la station correspondante. Si aucune réponse n'est faite après trois appels, la transmission n'est pas poursuivie.

2. Si la station réceptrice juge que, malgré une réception défectueuse, le radiotélégramme peut être remis, elle inscrit la mention de service : « Réception douteuse » à la fin du préambule et donne cours au radiotélégramme.

XXVIII. — Toutes les stations sont tenues d'échanger le trafic avec le minimum de dépense d'énergie nécessaire pour assurer une bonne communication.

d) *Accusé de réception et fin du travail*

XXIX. — 1. L'accusé de réception se donne, dans la forme prescrite par le règlement télégraphique international, précédé de l'indicatif de la station transmettrice et suivi de l'indicatif de la station réceptrice.

2. La fin du travail entre deux stations est indiquée par chaque station au moyen du signal ...—.— suivi de son indicatif.

e) *Direction à donner aux radiotélégrammes*

XXX. — 1. En principe, la station de bord transmet ses radiotélégrammes à la station côtière la plus rapprochée.

2. Toutefois, un expéditeur à bord d'un navire a le droit d'indiquer la station côtière par laquelle il désire que son radiotélégramme soit expédié.

La station de bord attend alors jusqu'à ce que cette station côtière soit la plus rapprochée. Si cette condition n'est pas réalisable, il n'est donné satisfaction à l'expéditeur que si la transmission peut s'effectuer sans troubler le service d'autres stations.

7. Remise des radiotélégrammes a destination

XXXI. — Lorsque, pour une cause quelconque, un radiotélégramme provenant d'un navire en mer ne peut être remis au destinataire, il est émis un avis de non-remise. Cet avis est transmis au navire s'il est possible. Lorsqu'un radiotélégramme parvenu à une station de bord ne peut être remis, cette station en fait part au bureau d'origine par avis de service. Cet avis est transmis, autant que possible, à la station côtière par laquelle a transité le radiotélégramme ou, le cas échéant, à la station côtière la plus rapprochée.

XXXII. — Si le navire auquel est destiné un radiotélégramme n'a pas signalé sa présence à la station côtière dans le délai indiqué par l'expéditeur ou, à défaut d'une telle indication, jusqu'au matin du vingt-neuvième jour suivant, cette station côtière en donne avis à l'expéditeur.

Celui-ci a la faculté de demander par avis de service taxe, télégraphique ou postal, adressé à la station côtière, que son radiotélégramme soit retenu pendant une nouvelle période de

trente jours pour être transmis au navire, et ainsi de suite. A défaut d'une telle demande, le radiotélégramme est mis au rebut à la fin du trentième jour (jour de dépôt non compris).

Toutefois, si la station côtière a l'assurance que le navire est sorti de son rayon d'action avant qu'elle ait pu lui transmettre le radiotélégramme, cette station en avise l'expéditeur.

8. Télégrammes spéciaux

XXXIII. — Ne sont pas admis :

a) Les télégrammes avec réponse payée ;

b) Les télégrammes-mandats ;

c) Les télégrammes avec collationnement ;

d) Les télégrammes avec accusé de réception ;

e) Les télégrammes à faire suivre ;

f) Les télégrammes de service taxés, sauf en ce qui concerne le parcours sur les lignes du réseau télégraphique ;

g) Les télégrammes urgents, sauf en ce qui concerne le parcours sur les lignes du réseau télégraphique, sous réserve de l'application des prescriptions du règlement télégraphique international ;

h) Les télégrammes à remettre par exprès ou par poste.

9. Archives

XXXIV. — Les originaux des radiotélégrammes et les documents y relatifs retenus par les administrations ou les exploitations privées sont conservés au moins pendant douze mois à compter du mois qui suit le mois du dépôt du radiotélégramme, avec toutes les précautions nécessaires au point de vue du secret.

Ces originaux et documents sont, autant que possible, envoyés au moins une fois par mois par les stations de bord aux administrations dont elles relèvent.

10. Détaxes et remboursements

XXXV. — 1. En ce qui concerne les détaxes et remboursements, il est fait application des dispositions du règlement télégraphique international en tenant compte des restrictions indiquées à l'article XXXIII du présent règlement et sous les réserves suivantes :

Le temps employé pour la transmission radiotélégraphique

ainsi que la durée de son séjour dans la station côtière ou dans la station de bord ne comptent pas dans les délais concernant les détaxes et remboursements.

Le remboursement est supporté par les différentes administrations ou exploitations privées qui ont participé à l'acheminement du radiotélégramme, chaque administration abandonnant sa part de taxe. Toutefois, les radiotélégrammes auxquels sont applicables les articles 7 et 8 de la convention de Saint-Pétersbourg restent soumis aux dispositions du règlement télégraphique international, sauf lorsque l'acceptation de ces radiotélégrammes est le résultat d'une erreur de service.

2. Lorsque l'accusé de réception d'un radiotélégramme n'est pas parvenu à la station qui l'a transmis, la taxe n'est remboursée que lorsqu'il a été établi que le radiotélégramme donne lieu à remboursement.

11. Comptabilité

XXXVI. — 1. Les taxes côtières et de bord n'entrent pas dans les comptes prévus par le règlement télégraphique international.

Les comptes concernant ces taxes sont liquidés par les administrations des gouvernements intéressés. Ils sont établis par les administrations dont relèvent les stations côtières et communiqués par elles aux administrations intéressées.

2. Pour la transmission sur les lignes du réseau télégraphique, le radiotélégramme est traité, au point de vue des comptes, conformément au règlement télégraphique international.

3. Pour les radiotélégrammes originaires des navires, l'administration dont relève la station de bord est débitée par celle dont relève la station côtière des taxes côtières et télégraphiques ordinaires perçues à bord des navires.

Pour les radiotélégrammes à destination des navires, l'administration qui a perçu les taxes est débitée directement par l'administration dont relève la station côtière des taxes côtières et de bord. Cette dernière crédite l'administration dont relève le navire de la taxe de bord.

Toutefois, dans le cas où l'administration qui a perçu les taxes est la même que celle dont relève la station de bord, la taxe de bord n'est pas débitée par l'administration dont dépend la station côtière.

4. Les comptes mensuels servant de base à la comptabilité spéciale des radiotélégrammes sont établis télégramme par télégramme avec toutes les indications utiles et dans un délai de six mois à partir du mois auquel ils se rapportent.

5. Les gouvernements se réservent la faculté de prendre entre eux et avec les exploitations privées (entrepreneurs exploitant des stations radiotélégraphiques, compagnies de navigation, etc.) des arrangements spéciaux en vue de l'adoption d'autres dispositions concernant la comptabilité.

12. Bureau international

XXXVII. — Le bureau international des administrations télégraphiques sera chargé, sous réserve du consentement du gouvernement de la Confédération suisse et de l'approbation de l'union télégraphique, des attributions déterminées à l'article 13 de la convention.

Les dépenses supplémentaires résultant du fonctionnement du bureau international, en ce qui concerne la radiotélégraphie, ne doivent pas dépasser 40 000 fr. par an, non compris les frais spéciaux auxquels donne lieu la réunion d'une conférence internationale.

Ces dépenses font l'objet d'un décompte spécial et il est fait application à leur sujet des dispositions du règlement télégraphique international. Toutefois, en attendant la réunion de la prochaine conférence, chaque gouvernement contractant fait connaître au bureau international la classe dans laquelle il désire être inscrit.

XXXVIII. — Les différentes administrations font parvenir au bureau international un tableau conforme au modèle ci-joint et contenant les indications énumérées dans ledit tableau pour les stations visées à l'article IV du règlement. Les modifications survenues et les suppléments sont communiqués par les administrations au bureau international du 1er au 10 de chaque mois. A l'aide de ces communications, le bureau dresse une nomenclature qu'il tient au courant. La nomenclature et ses suppléments sont imprimés et distribués aux administrations intéressées ; ils peuvent également être vendus au public au prix de revient.

Le bureau international veille à ce que l'adoption d'indicatifs identiques pour les stations radiotélégraphiques soit évitée.

13. Dispositions diverses

XXXIX. — Les administrations facilitent la communication, aux agences d'informations maritimes qu'elles agréent, des renseignements concernant les avaries et sinistres maritimes ou présentant un intérêt général pour la navigation, dont les stations côtières peuvent régulièrement donner communication.

XL. — Les transmissions échangées entre les stations de bord, visées à l'article 1 de la convention, doivent s'effectuer de manière à ne pas troubler le service des stations côtières, celles-ci devant avoir, en règle générale, le droit de la priorité pour la correspondance publique.

XLI. — 1. A moins d'arrangements spéciaux entre les intéressés, les dispositions du présent règlement sont applicables, par analogie, à l'échange radiotélégraphique entre deux navires en mer, sauf les exceptions suivantes :

a) Article XIV. La taxe de bord revenant au navire transmetteur est perçue sur l'expéditeur et celle revenant au navire récepteur est perçue sur le destinataire.

b) Article XVIII. L'ordre de transmission est réglé chaque fois de commun accord entre les stations correspondantes.

c) Article XXXVI. Les taxes des radiotélégrammes en question n'entrent pas dans les comptes prévus à cet article, ces taxes étant acquises aux administrations qui les ont encaissées.

2. La retransmission des radiotélégrammes échangés entre les navires en mer est subordonnée à des arrangements spéciaux entre les intéressés.

XLII. — Les dispositions du règlement télégraphique international sont applicables par analogie à la correspondance radiotélégraphique en tant qu'elles ne sont pas contraires aux dispositions du présent règlement.

Conformément à l'article 11 de la convention de Berlin, ce règlement entrera en vigueur le 1er juillet 1908.

En foi de quoi, les plénipotentiaires respectifs ont signé le règlement en un exemplaire qui restera déposé aux archives du gouvernement impérial d'Allemagne et dont une copie sera remise à chaque partie.

Fait à Berlin, le 3 novembre 1906.

Administration de ....

(Annexe à l'article XXXVIII du Règlement)

État signalétique des stations radiotélégraphiques.

a) Stations côtières

NOM	NATIONALITÉ	POSITION géographique	INDICATIF d'appel	PORTÉE normale	SYSTÈME radiotélégraphique	CATÉGORIE des appareils récepteurs (appareils écrivants, appareils à réception auditive ou autres)	LONGUEURS d'onde (la longueur d'onde normale est soulignée)	NATURE du service effectué par la station	HEURES d'ouverture (avec l'indication du méridien auquel elles se rapportent)	TAXE côtière avec indication du minimum de taxe	OBSERVATIONS

b) Stations de bord

NOM	NATIONALITÉ	SIGNAL distinctif du code international de signaux	INDICATION du port d'attache	INDICATIF d'appel	PORTÉE normale	SYSTÈME radiotélégraphique	CATÉGORIE des appareils récepteurs (appareils écrivants, appareils à réception auditive ou autres)	LONGUEURS d'onde (la longueur d'onde normale est soulignée)	NATURE du service effectué par la station	HEURES d'ouverture	TAXE de bord avec indication du minimum de taxe	OBSERVATIONS
1° Navires de guerre												
2° Navires de commerce												

ORGANISATION

DE LA

TÉLÉGRAPHIE SANS FIL EN FRANCE

(Extrait du *Journal officiel* du 6 mars 1907)

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS, DES POSTES ET DES TÉLÉGRAPHES

Rapport au Président de la République française

Paris, le 5 mars 1907.

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

Les perfectionnements apportés à la télégraphie sans fil et l'extension des applications de ce mode de correspondance ont attiré, depuis longtemps, l'attention du gouvernement. Aussi, chacun dans son domaine, tous les divers départements intéressés se sont efforcés de se constituer un outillage approprié et d'établir les postes dont l'utilité immédiate avait été reconnue par eux. Toutefois, si une telle dispersion d'efforts avait peu d'inconvénients tant que la télégraphie sans fil était encore, en quelque sorte, une science de laboratoire, il n'en saurait plus être de même aujourd'hui où les services rendus par elle deviennent susceptibles d'une régularité véritablement commerciale.

Il est nécessaire, dans ces conditions, que le réseau en formation ne soit plus simplement la résultante de nécessités particulières, mais réponde à un plan d'ensemble et à tous les besoins généraux qui sont en cause.

A cet effet, un accord a été établi entre les divers départements intéressés au sujet de la constitution présente du réseau. Cet accord doit être complété par des dispositions assurant à l'avenir une entière coordination des efforts, qu'il

s'agisse du mode d'exploitation ou de l'établissement de nouveaux postes.

Le décret que j'ai l'honneur de soumettre à votre haute approbation résume les règles arrêtées à cet effet. Elles ont recueilli l'assentiment de tous les ministres intéressés et permettront, tout en facilitant l'essor de la télégraphie sans fil, de procurer à celle-ci les conditions d'unité et d'harmonie nécessaires à tout service public.

Je vous prie d'agréer, monsieur le Président, l'hommage de mon profond respect.

Le ministre des travaux publics,
des postes et des télégraphes,
Louis Barthou.

Le Président de la République française,

Vu la loi du 2 mai 1837 sur le monopole des lignes télégraphiques ;

Vu la loi du 9 novembre 1850 sur la télégraphie privée ;

Vu le décret-loi du 27 décembre 1851, portant, dans son article 1, qu'aucune ligne télégraphique ne peut être établie ou employée à la transmission des correspondances que par le gouvernement ou avec son autorisation ;

Vu la loi du 5 avril 1878, autorisant l'administration des postes et des télégraphes à consentir des abonnements à prix réduits pour la transmission des dépêches télégraphiques lorsque cette transmission s'effectue en dehors des conditions ordinaires établies pour l'application des taxes télégraphiques ;

Vu le décret du 7 février 1903, relatif à l'établissement et à l'exploitation des postes de télégraphie sans fil destinés à l'échange de la correspondance officielle ou privée ;

Vu le décret du 27 février 1904, réglant le régime administratif auquel seront soumis les postes côtiers de télégraphie sans fil ;

Sur le rapport du ministre des travaux publics, des postes et des télégraphes,

Décrète :

Art. 1. — Les stations radiotélégraphiques établies ou à établir sur des emplacements fixes en France, Algérie et Tunisie, sont classés en quatre catégories, savoir :

Stations côtières ou intérieures spéciales au service commercial ;

Stations côtières spéciales au service de la marine de guerre ;

Stations spéciales aux communications militaires ;

Stations spéciales au service des phares et balises.

Des stations privées peuvent être, en outre, établies dans certains cas et en vertu d'autorisations temporaires.

Art. 2. — Les stations spéciales au service commercial sont établies, entretenues et exploitées par l'administration des postes et des télégraphes.

Les stations côtières spéciales au service de la marine de guerre sont établies, entretenues et exploitées par le ministère de la marine.

Les stations spéciales aux communications militaires sont établies, entretenues et exploitées par le ministère de la guerre.

Les stations spéciales au service des phares et balises sont établies, entretenues et exploitées par les soins du ministère des travaux publics, des postes et des télégraphes.

En cas de mobilisation, toutes les stations sans exception sont soumises à l'autorité des départements de la marine et de la guerre.

Art. 3. — Le choix de l'emplacement, la détermination de portée d'une station quelconque et, d'une manière générale, les conditions techniques applicables à toute station projetée sont soumis à l'examen d'une commission interministerielle instituée comme il est dit à l'article 4 ci-après. Cette commission a pour mission d'apprécier les desiderata des divers services et d'indiquer aux administrations intéressées dans quelles conditions il lui paraît possible de concilier leurs intérêts respectifs.

Art. 4. — Il est institué, auprès du ministre des travaux publics, des postes et des télégraphes, une commission technique interministérielle comprenant les membres suivants :

1 président désigné par décret présidentiel et choisi en dehors des administrations intéressées ;

2 représentants techniques du ministère de la marine ;

2 représentants techniques du ministère de la guerre ;

1 représentant du ministère des travaux publics, des postes et des télégraphes (travaux publics) ;

1 représentant du ministère des colonies ;

1 représentant du ministère des affaires étrangères ;

2 représentants de l'administration des postes et des télégraphes ;

1 secrétaire pris dans l'administration des postes et des télégraphes et n'ayant pas voix délibérative.

ART. 5. — Les attributions de la commission technique sont les suivantes :

Examen, à titre consultatif, des emplacements et conditions techniques afférentes à toutes stations destinées à constituer le réseau radiotélégraphique français ;

Examen des réclamations d'ordre technique relatives au fonctionnement des stations françaises, formulées soit par des services de l'État, soit par des services privés, soit par des puissances étrangères ;

Institution d'expériences d'intérêt général.

La commission est informée, par les soins des administrations intéressées, des résultats obtenus à l'aide des divers types d'appareils ou de montages utilisés par les postes en fonctionnement.

ART. 6. — En dehors des périodes de mobilisation, toutes les stations côtières radiotélégraphiques et les stations spéciales au service commercial, à l'exception de celles qui fonctionnent à titre d'essai ou d'exercice, sont ouvertes à la télégraphie privée.

ART. 7. — L'administration des postes et des télégraphes est chargée de centraliser toutes les affaires concernant la perception des taxes et les relations administratives avec les stations étrangères et le bureau international de Berne. Elle vérifie, sur le vu d'états transmis par les stations des administrations intéressées, la perception des taxes appliquées. Elle contrôle l'exécution des règlements internationaux en ce qui concerne les transmissions commerciales dans les postes fixes de la France, de l'Algérie et de la Tunisie et dans les postes établis à bord des navires de commerce.

ART. 8. — Les autorisations d'installations de postes privés sont accordées par l'administration des postes et des télégraphes, sur avis de la commission technique prévue à l'article 4. Ces installations ne peuvent être que temporaires et ne doivent en aucun cas troubler le service des autres stations.

ART. 9. — Les frais d'expériences à exécuter sur la demande de la commission technique sont imputés sur un

crédit spécial inscrit au budget de l'administration des postes et des télégraphes.

ART. 10. — Les ministres des travaux publics, des postes et des télégraphes, de la guerre, de la marine, des colonies et des affaires étrangères sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret.

ART. 11. — Les dispositions du décret du 7 février 1903 et du décret du 27 février 1904 sont abrogées.

Fait à Paris, le 5 mars 1907.

A. FALLIÈRES.

Par le Président de la République :

Le ministre des travaux publics,
des postes et des télégraphes,
Louis BARTHOU.

Le ministre de la guerre,
G. PICQUART.

Le ministre de la marine,
Gaston THOMSON.

Le ministre des colonies,
MILLIÈS-LACROIX.

Le ministre des affaires étrangères,
S. PICHON.

Liste des stations radiotélégraphiques côtières du monde entier (mise à jour au 1er octobre 1906) [1]

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
EUROPE						
Angleterre						
Roche Point	»	»	180 env.	Marconi.	Amirauté.	
Felixstone	»	»	»	Id.	Id.	
Dover	D D D	220-340	»	Id.	Id.	
Culver Cliff	C L	340-450 (?)	»	Id.	Id.	
Portland	»	340 (?)	»	Id.	Id.	
Scilly (îles)	»	»	»	Id.	Id.	
Fastnet (Irlande)	»	»	»	Id.	Id.	
Brow Head (Irlande)	»	»	»	Id.	Id.	
Malin Head (Irlande)	M H	»	»	Id.	Id.	
Inishtrahull (Irlande)	I H	»	»	Id.	Id.	
Flannon (île, Irlande)	»	»	»	Id.	Id.	
Butt of Lewis (Écosse)	»	»	»	Id.	Id.	
Fraserburgh (Écosse)	»	»	»	Id.	Id.	
Withernsea	W S	»	»	Id.	Id.	
Caister	C S	»	»	Id.	Id.	
North Foreland	N F	»	»	Id.	Id.	
Niton	U I	220	»	Id.	Id.	
Lizard	L D	100	»	Id.	Id.	
Holy Head (Anglesey)	H D	220	»	Id.	Id.	
Rosslare (Irlande)	R L	220	»	Id.	Id.	
Crookhaven (Irlande)	C K	100	»	Id.	Id.	
Chelmsford	C D	220	»	Id.	»	
Liverpool	»	»	»	Id.	»	Pas en service.
Trinton	F N	220	»	Id.	»	
Poldhu	»	1 920-1 620	»	Id.	»	Extra-puissant.
Haven	H H	Variable.	»	Id.	»	

Broomfield (?)	B R	Variable.	»	Marconi.	»	
E. Goodwin (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
S. Goodwin (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
Cross Sand (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
Gull (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
Tongue (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
Sunk (bateau-feu)	»	»	»	Id.	»	
Heysham	»	»	»	Lodge-Muirhead.	»	
Newhaven	»	»	110	Rochefort.	Cie des ch. de fer de l'O.	Communication avec Dieppe.
Saint Catherine's Point	»	»	180	Marconi.	British Lloyd.	En projet.
Saint Abb's Head	»	»	180	Id.	»	Id.
Tory (île)	»	»	180	Id.	»	Id.
A l'ouest de l'Irlande	»	»	»	Id.	»	Ultra-puissant, en projet.
Portheurno (Cornwall)	»	»	95	Maleskyne.	»	En projet.
Marchrihanish Bay (Ecosse)	L K	»	5 000-9 000	Fessenden.	Nat. Elect. Sig. Co.	En construction.
A l'ouest de l'Écosse et aux Hébrides	»	»	5 000	de Forest.	de Forest, W. T. Co.	En projet.
Malte	M A	210 (?)	»	Marconi.	Amirauté.	
Gibraltar (station basse)	G I B	100-220-340	84-139	Id.	Id.	
Gibraltar (station haute)	G I B	100-220-340	84-139	Id.	Id.	

Allemagne

Arcona	K A R	350 320/380	200	Telefunken.	Ministère de la marine.	Ouvert au service public.
Marienleuchte	K M R	350 320/380	200	Id.	Id.	Id.
Bülk	K B K	350 320/380	200	Id.	Id.	Id.

1. Extrait des publications officielles du ministère de la marine des États-Unis.

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Heligoland	K H G	350 $\frac{320}{380}$	200	Telefunken.	Ministère de la marine.	Ouvert au service public.
Cuxhaven.	K C X	350 $\frac{320}{380}$	200	Id.	Id.	Id.
Brunsbuttelkoog	K B R	350	»	Id.	Canal Office.	Id.
Bremerhaven.	K B H	315-330	»	Id.	North German Lloyd.	Id.
Borkum Reef (bateau-feu). . . .	F B R	350	100-146	Id.	Postes et télégraphes.	Id.
Borkum.	K B M	350	100-175	Id.	Id.	Id.
Outer Jade (bateau-feu).	F A U	350 $\frac{320}{380}$	»	»	Ministère de la marine.	Id.
Weser (bateau-feu)	F W F	360	»	Id.	Service des phares.	Id.
Elbe I (bateau-feu)	F E F	365 (?)	»	Id.	Id.	Id.
Norddeich	»	»	1 500	Id.	Postes et télégraphes.	Id.

Autriche-Hongrie

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Musil.	M U	350	93	Telefunken.	Ministère de la marine.	Expériences.
Lussin	L U	350	100	Id.	Id.	Id.

Belgique

Nieuport	N P	73	100	Marconi.	Postes et télégraphes.	Ouvert au service public.

Danemark

Blaavands Huk	B	200	80	Telefunken.	Ministère de la marine.	Service spécial.
Horns Reef (bateau-feu)	»	225	55	Id.	Id.	Id.
Vyl (bateau-feu).	»	180	30	Id.	Id.	Id.
A Mayer	»	»	300	Id.	Id.	Expériences.
Gjedser.	G J	350	100	Id.	»	Service spécial.
Gjedser Reef (bateau-feu). . . .	»	160	16	Id.	»	Id.
Lyngby.	»	»	»	Poulsen.	The Amalgamated, Radio-Telegr. C°.	Expériences.
Esbjerg.	»	»	»	Id.	The Amalgamated, Radio-Telegr. C°.	Id.

Espagne

Cap Finistère.	»	»	»	Telefunken.	Gouvernement.	En projet.
La Corogne.	»	160	37	Id.	Compagnie privée.	
Le Ferrol.	»	160	37	Id.	Id.	
Almeria	»	»	200	Id.	Gouvernement.	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
France						
Pointe du Raz	»	280	»	État français.	Ministère de la marine.	Service spécial.
Saint-Mathieu	»	280	»	Id.	Id.	Id.
Parc aux Ducs	»	280	»	Id.	Id.	Id.
Port-Vendres	»	280	»	Id.	Id.	Id.
Agde	»	280	»	Id.	Id.	Id.
Ouessant	»	600	»	Id.	Postes et télégraphes.	Ouvert au public.
Porquerolles	»	280	»	Id.	Id.	Id.
Dieppe	»	»	»	Rochefort.	Compagnie de l'Ouest.	Communic. avec Newhaven.
Dunkerque	»	600	»	État français.	Ministère de la marine.	En projet.
Cherbourg	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Brest	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Lorient	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Rochefort	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Toulon	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Ajaccio	»	300	»	Id.	Id.	Id.
Oran	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Bizerte	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Saint-Louis-du-Rhône	»	600	»	Id.	Postes et télégraphes.	Id.
Alger	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Nice	»	600	»	Id.	Id.	Id.
Cap Corse	»	600	»	Id.	Id.	Id.

Grèce						
Le Pirée	»	»	»	»	»	En projet.
Hollande						
Overloom	B R B R	»	350	Marconi.	Compagnie privée.	
Amsterdam	»	Variable.	200	Telefunken.	Ministère de la marine.	
Helder	»	Id.	200	Id.	Id.	
Scheveningue	S C H	350-450	175-300	Id.	Postes et télégraphes.	
Hoek van Holland	»	»	»	Variés.	Id.	Corresp. avec Scheveningue.
Haaks (bateau-feu)	H K S	200	100	Telefunken.	Id.	Service spécial.
Italie						
Capo delle Melle	C M	340-450 (?)	350	Marconi.	Ministère de la marine.	
Palmaria	P M	340-450 (?)	350	Id.	Id.	
Becco di Vela (Caprera)	B V	340-450	350	Id.	Id.	
Capo Sperone (Sardaigne)	P N	450	350	Id.	Id.	
Aspinara (Sardaigne)	A S	350-450	350	Id.	Postes et télégraphes.	
Coltano	»	»	»	Id.	Id.	Extra-puissant.
Campo alle Serre (Elbe)	C S	340-450 (?)	350	Id.	Ministère de la marine.	
Monte Mario (Rome)	R M	340-450 (?)	350	Id.	Id.	
Ponza (île)	P S	3,0-450 (?)	350	Id.	Id.	
Forte Spuria	F S	350	110	Id.	Id.	
Messine	M R	350	»	Id.	Electrique Compagnie.	
Reggio	M V	350	350	Id.	Id.	
Cozzo Spadaro (Sicile)	C Z	350-450 (?)	350	Id.	Ministère de la marine.	
Trapani	»	»	350	Id.	Id.	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Santa Maria di Leuca	S L	220-350-450	350	Marconi.	Ministère de la marine.	
Bari	S C	3 ondes (?)	100-200-500	Id.	Postes et télégraphes.	
Viesti (mont Gargano).	V T	350-450	350	Id.	Id.	
Mont Capucin (Ancône)	M P ou C P	340-220	350	Id.	Id.	
Malamocea (Venise).	T P	110-450	»	Id.	Id.	
Monténégro						
Antivari	M N	3 ondes (?)	100-200-500	Marconi.	Compagnie Marconi.	
Norvège						
Lofoden (îles).	»	350	»	Marconi.	Ministère de la marine.	

Portugal

Cascaes	»	540	66	Telefunken.	Postes et télégraphes.	

Roumanie

Constanza	»	»	200	Branly-Popp.	Gouvernement.	
Sulina	»	»	»	Id.	Postes et télégraphes.	En projet.

Russie d'Europe

Libau	»	360	200	Telefunken.	Ministère de la marine.	
Cronstadt	»	360	300	Id.	Id.	
Saint-Pétersbourg	»	360	40	Id.	Id.	
Reval	»	360	200	Marconi.	Id.	
Helsingfors	»	»	200	Telefunken.	Id.	
Sébastopol	»	360	200	Id.	Id.	
Kherson	»	»	200	Ducretet-Popoff.	Id.	
Lindau	»	»	»	»	»	
Preste	»	»	»	Marconi.	Id.	
Abo	»	»	100	Id.	Id.	
Gaugö	»	»	100	Id.	Id.	
Porkalaudd	»	»	100	Id.	Id.	
Leckte	»	»	100	Id.	Id.	
Nicolaistadt	»	»	200	Id.	Id.	
Hafssal	»	»	200	Id.	Id.	
Peterhoff	»	»	40	Telefunken.	Id.	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
			Suède			
Vaxholm (Stockholm).	»	350	150	Telefunken.	Ministère de la marine.	Service spécial.
Farösund Gotland.	»	350	150	Id.	Id.	Id.
Carlskrona	»	350	150	Id.	Id.	Id.
			Turquie			
Rhodes.	»	»	»	Telefunken.	Gouvernement.	
Dernah (Tripoli).	»	500-1 200	750	Id.	Id.	Service public.
Guelemiah (Patra).	»	500-1 200	750	Id.	Id.	Id.

AMÉRIQUE

Argentine

Buenos-Ayres.	B A	»	»	Telefunken.	»	
Rio de Santiago.	R S	»	»	Id.	»	
Recalada (bateau-feu).	R C	»	»	Id.	»	
Cabo Virgines	»	»	»	Id.	»	En projet
Ushuaia (Terre de Feu).	»	»	»	Id.	»	Id.

Brésil

Ihla Grande (Rio de Janeiro). . .	P C	1 000	200	Telefunken.	»	
Fort Santa-Cruz (Rio de Janeiro).	F C	1 000	200	Id.	»	
Ihla de Cobras	»	1 000	200	Id.	»	
Para	»	»	»	Shœmaker.	»	
Santarem.	»	»	»	Id.	»	
Manaos.	»	»	»	Id.	»	

Canada

Chateau Bay (Labrador).	C B	100-220 / 340-450	240	Marconi.	»	
Point Amour (Labrador).	P R	100-220 / 340-450	240	Id.	»	
Whittle Rocks (Labrador). . . .	W R	100-220 / 340-450	240	Id.	»	
Battle Harbour (Labrador). . . .	B H	220	240	Id.	»	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Seven Islands (Québec)	»	»	»	Marconi.	»	
Father Points (Québec)	»	»	»	Id.	»	
Cape Bear (Prince Edwards Island)	»	»	»	Id.	»	
Belle Isle (Québec)	B J	100-220 340-450	240	Id.	Gouvernement.	
Fame Point (Québec)	F P	240	240	Id.	Id.	
Cape Race (Newfoundland)	C E	»	240	Id.	Id.	
Cape Ray (Newfoundland)	C R	»	240	Id.	Id.	
Venison Island (Newfoundland)	V I	220	240	Id.	Id.	
Danino (Newfoundland)	»	220	240	Id.	Id.	
Cape Sable (Newfoundland)	S B	220	240	Id.	Id.	
Cape Rich	T C	»	»	»	»	
Camperdown (Halifax N S)	»	»	240	Id.	Compagnie Marconi.	
Patridge Island (Saint John N B)	»	220	240	Id.	Gouvernement.	
Heast Point (Anticosti)	H P	100-220	240	Id.	Id.	
Sable Island	S D	»	240	Id.	Compagnie Marconi.	
Victoria B C	B C	350	240	Id.	Gouvernement.	

Chili

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Détroit de Magellan	»	»	»	Marconi.	»	En projet.

Colombie						
Santa Marta	»	»	»	Shœmaker.	»	
Costa Rica						
Puerto Limon	»	»	»	de Forest.	United Fruit C°.	
Puerto Limon	»	»	»	Shœmaker.	»	
Puerto Limon	»	»	»	Id.	Id.	
Cuba						
La Havane	H V	»	»	de Forest.	»	
Équateur						
Guayaquil	»	»	200	»		En projet.
Isla de Puna	»	»	200	»	»	Id.

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
États-Unis						
Cap Élisabeth (Me)	P A	»	»	Telefunken.	Ministère de la marine.	5 kw.
Portsmouth (N H)	P C	»	»	Stone.	Id.	3 kw.
Boston (Mass)	P G	»	»	Id.	Id.	Id.
Cape Cod	P H	»	»	Telefunken.	Id.	5 kw.
Nantucket Shoal (bateau-feu)	P I	»	»	Id.	Id.	Id.
Newport (R I)	P K	»	»	Id.	Id.	Id.
Fire Island (N Y)	P R	»	»	Id.	Id.	Id.
Navy Yard (N Y)	P T	»	»	Id.	Id.	15 kw.
Cape Henlopen	P X	»	»	Id.	Id.	3 kw.
Annapolis (M L)	Q O	»	»	Slaby, Arco et de Forest.	Id.	5 kw.
Washington (D C)	Q I	»	»	Telefunken.	Id.	15 kw.
Norfolk (Va)	Q L	»	»	Slaby, Arco et de Forest.	Id.	3 kw.
Cape Henry (Va)	Q N	»	»	de Forest.	Id.	Id.
Diamond Shoal (bateau-feu)	Q P		»	Fessenden.	Id.	1 1/2 kw.
Bateau-feu n° 66	»	»	»	Telefunken.	Id.	5 kw.
Bateau-feu n° 71	»	»	»	Id.	Id.	1 1/2 kw.
Pivers Island (N C)	Q S	»	»	Massie.	Id.	5 kw.
Charlestown (S C)	Q U	»	»	Id.	Id.	Id.
Bateau-feu n° 34	Q V	»	»	Fessenden.	Id.	1/2 kw.
Saint Augustine (Fla)	Q X	»	»	Shœmaker.	Id.	5 kw.
Jupiter Inley (Fla)	R A	»	»	Id.	Id.	Id.
Key West (Fla)	R D	»	»	de Forest.	Id.	35 kw (3 mâts de 70 m).
Dry Tortugos (Fla)	R F	»	»	Telefunken.	Id.	3 kw.
Pensacola (Fla)	R K	»	»	de Forest.	Id.	10 kw.
New Orleans (Lo)	R O	»	»	Telefunken.	Id.	5 kw.
San Juan (P R)	S A	»	»	de Forest.	Id.	35 kw (3 mâts de 65 m).
Culebra (W I)	S D	»	»	Slaby, Arco et de Forest.	Id.	3 kw.
Guantanamo (Cuba)	S I	»	»	de Forest.	Id.	35 kw (3 mâts de 65 m).
Canal Zone (L D)	S L	»	»	Id.	Id.	Id. Id.
Navy Yard Puget Sound	S P	»	»	»	Id.	3 kw.
Tatoosh	S V	»	»	»	Id.	15 kw.
Table Bluff [illegible]	T D	»	»	[illegible]	Id.	[illegible]
Mare Island (Cal)	T G	»	»	Slaby, Arco et de Forest.	Id.	Id.

North Head	S X	»	»	»	Id.	10 kw.
Cape Blanco	T A	»	»	»	Id.	5 kw.
Table Bluff	T D	»	»	»	Id.	Id.
Mare Island (Cal)	T G	»	»	Slaby, Arco et de Forest.	Id.	Id.
Farallon Islands (Cal)	T H	»	»	»	Id.	10 kw.
Yerba Buena (Cal)	T I	»	»	Slaby, Arco.	Id.	5 kw.
Point Arguello (Cal)	T K	»	»	Shœmaker.	Id.	2 kw.
Point Loma (Cal)	T M	»	»	»	Id.	5 kw.
Ile d'Oahu (Hawaï)	U C	»	»	Telefunken et Shœmaker.	Id.	3 kw.
Ile de Guam	U K	»	»	Shœmaker.	Id.	Id.
Cavite (P I)	U T	»	»	Id.	Id.	Id.
Cabra Island (P I)	U Y	»	»	»	Id.	
Atlantic City (N J)	A X	»	»	de Forest.	»	
Babylon (L I)	B A	»	»	Marconi.	»	
Bridgeport (Conn)	B O	»	»	de Forest.	»	
Block Island (R I)	B I	»	»	Massie.	»	
Norfolk (Va)	N F	»	»	de Forest.	»	
Boston (Mass)	B N	»	»	Id.	»	
Brant Rook (Mass)	B O	»	»	Fessenden.	»	
Buffalo (N Y)	B V	»	»	de Forest.	»	
Cape Cod (Mass)	C C	»	»	Marconi.	»	
Cleveland (Ohio)	C D	»	»	de Forest.	»	
Collingwood (N J)	C G	»	»	Fessenden.	»	
Chicago (South Side)	C H	»	»	de Forest.	»	
Cleveland (Ohio)	C N	»	»	Clark.	»	
Cape May (N J)	C P	»	»	Massie.	»	
Detroit (Mich)	C W	»	»	Clark.	»	
Portland (Me)	D	»	»	de Forest.	»	
Washington (D C)	D C	»	»	Fessenden.	»	
Mahatan Beach (N Y)	D F	»	»	de Forest.	»	
Safety Harbor (Alaska)	F A	»	»	»	Ministère de la guerre.	
Benicia Barracks (Cal)	F B	»	»	»	Id.	
Fort Wood (N Y)	F D	»	»	Clark.	Id.	
Fort Wadsworth (N Y)	F H	»	»	Id.	Id.	
Fort Leawenworth (Kansas)	F L	»	»	»	Id.	
Fort Sloeum (N Y)	F M	»	»	»	Id.	
Saint Michaels (Alaska)	F M	»	»	»	Id.	
Zamboanga (P I)	F M	»	»	»	Id.	
Fort Hancock (N J)	F N	»	»	»	Id.	
Fort Omaha (Nebr)	F N	»	»	»	Id.	
Fort Schuhyler (N Y)	F S	»	»	»	Id.	
Presidio de San Francisco (Cal)	F S	»	»	»	Id.	
Jolo (P I)	F S	»	»	»	Id.	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Providence (R I)	F T	»	»	de Forest.	»	
Fort Trotten (N Y)	F T	»	»	»	Ministère de la guerre.	
Fort Wright (N Y)	F W	»	»	Fessenden.	Id.	
Fort Worden (Was)	F W	»	»	»	Id.	
Galilée (N J)	G	»	»	de Forest.	»	
Charlestown (S C)	S N	»	»	Id.	»	
Colombus (Ohio)	C U	»	»	Id.	»	
Galveston (Tex)	G V	»	»	Id.	»	
Cap Hatteras (N C)	H A	»	»	Id.	»	
New Orleans (La)	H B	»	»	Id.	»	
Hartford (Conn)	H D	»	»	Id.	»	
Port Huron (Mich)	H U	»	»	Id.	»	
Jersey City (N J)	J C	»	»	Fessenden.	»	
Kansas City (Mo)	K C	»	»	de Forest.	»	
Key West (Fla)	K W	»	»	Id.	»	
42 Broadway New York (N Y)	N Y	»	»	Id.	»	
Point Judith (R I)	P J	»	»	Massie.	»	
Paterson (N J)	P N	»	»	de Forest.	»	
Quogue (L I)	Q	»	»	Id.	»	
Siasconset	S C	»	»	Marconi.	»	
Springfield (Mass)	S F	»	»	de Forest.	»	
Sandy Hook	S H	»	»	Clark.	»	
Sagaponak	S K	»	»	Marconi.	»	
Gl Ec Co Schenectady (N Y)	S M	»	»	Fessenden.	»	
Savannah (Ga)	S V	»	»	de Forest.	»	
Southwest Pass (La)	S W	»	»	Id.	»	
Philadelphia (Pa)	W A	»	»	Id.	»	
Wilsons Pt Conn	W N	»	»	Massie.	»	
Gl Ec Co Lynn (Mass)	W Y	»	»	Fessenden.	»	
Atlanta (Ga)	A N	»	»	de Forest.	»	
New Orleans (La)	M C	»	»	Id.	»	

Mexique						
Cabo Haro, près Guayamas (Sonora)	»	500	250	Telefunken.	»	
Santa Rosalia (Californie)	»	500	250	Id.	»	
Panama						
Canal Zone	S L	»	»	de Forest.	Gouv. des Etats-Unis.	
Colon (2 stations) [?]	»	»	»	Id.	United Fruit C°.	
Bocas del Toro	»	»	»	Id.	Id.	
Nicaragua						
Bluefields	»	»	»	Shœmaker.		
Tobago						
Côte sud de l'île	»	»	»	Lodge-Muirhead.	Gouvernement anglais.	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Trinidad						
Port of Spain	S D	»	»	Lodge-Muirhead.	Gouvernement anglais.	
Uruguay						
Montevideo (Cerro)	M V	350	200	Telefunken	Society for W. T	

ASIE

Andaman (îles)

Port Blair.	»	425-455	560	Lodge-Muirhead.	»	
Diamond Island.	»	425-455	560	Id.	»	

Birmanie

Rangoon	»	425-455	»	Lodge-Muirhead.	»	

Chine

Pékin (ambassade italienne) . . .	P K	300	250	Marconi.	Gouvernement italien.	
Tientsin.	T N	300	250	Id.	Id.	
Takou	»	»	»	»	»	
Shanghaï.	»	»	»	»	»	
1° Int. Settlement.	»	300	200	Telefunken.	Arnhold Karberg et C°.	
2° Outside City	»	300	200	Id.	Id.	
Canton	»	»	»	Id.	Id.	En projet.

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Corée						
Masampo	»	»	»	»	»	
Mokpo	»	»	»	»	»	
Port Hamilton (île)	»	»	»	»	»	
Hawaii (îles)						
Barbers Point (Oahn)	B P	»	»	Marconi.	»	
Nawiliwili (Kanai)	N W	»	»	Id.	»	
Lahaina (Mani)	»	»	»	»	»	
Kawaihae (Hawaii)	»	»	»	»	»	
Kamalo (Molokai)	»	»	»	»	»	
Hong-Kong						
Cape d'Aguilar (Isl. East)	»	»	»	Marconi, Telefunken.	»	

Indes anglaises						
Bombay (Battery)	»	»	»	»	»	
Collaba (près Bombay)	»	»	»	»	»	
Indes hollandaises						
Macassar	»	»	120	Telefunken.	»	
Paré Paré	»	»	120	Id.	»	
Radjave	»	»	120	Id.	»	
Batavia	B A	600	200	Id.	»	
Cheribon	C B	600	200	Id.	»	
Indo-Chine						
Hanoï	»	»	»	Etat français.	Gouvernement.	Service spécial.
Haïphong	»	»	»	Id.	Id.	Id.
Baie d'Along	»	»	»	Id.	Id.	Id.
Japon						
Nagasaki (Kiushiu)	»	»	1 170	Teishinsho.	»	
Kilung (Formose)	»	»	1 170	Id.	»	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Russie d'Asie						
Vladivostok.	»	3 ondes.	1 500	Telefunken.	Ministère de la marine.	
Siam						
Bangkok	»	»	»	»	Société pour la T. S. F.	
Cosichang	»	»	»	»	Id.	

AFRIQUE

Égypte

Port-Saïd	P T	»	300	Marconi.	»	
Suez	P T	»	»	Id.	»	
Ile de Sheduan	»	»	»	Id.	»	

Madagascar

Diégo-Suarez	»	»	»	État français.	Ministère de la marine.	Service spécial.

Maroc

Ceuta	»	»	200	Telefunken.	Gouvernement espagnol.	
Melilla	»	»	200	Id.	Id.	

Mozambique

Inhaca, Delagoa Bay	»	»	»	Marconi.	»	
Renbea Pt, Delagoa Bay	»	»	»	Id.	»	

NOMS DES STATIONS	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE	OBSERVATIONS
Sénégal						
Dakar	»	300	»	État français.	Gouvernement.	En projet.
Saint-Louis	»	1 500	»	Id.	Id.	Id.
Baie du Lévrier	»	1 500	»	Id.	Id.	Id.
Tripoli						
Dernah	»	»	»	Telefunken.	»	

OCÉANIE

Nouvelle-Guinée

Côte sud de l'île.	»	»	»	»	»	

Australie

Cape York, Torres Strait	»	»	»	»	»	
Thursday Island, Torres Strait. .	»	»	»	»	»	

Liste des navires de commerce du monde entier possédant à bord une station radiotélégraphique (mise à jour au 1er octobre 1906) [1]

COMPAGNIES DE NAVIGATION	NOMS DES NAVIRES	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE de la station radiotélégraphique	OBSERVATIONS
EUROPE							
Angleterre							
Cunard Line (Liverpool)	*Aurania*	A A	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Caronia	R A	Id.	»	Id.	Id.	
	Campania	C A	Id.	»	Id.	Id.	
	Carpathia	P A	Id.	»	Id.	Id.	
	Etruria	E A	Id.	»	Id.	Id.	
	Ivernia	I A	Id.	»	Id.	Id.	
	Lucania	L A	Id.	»	Id.	Id.	
	Umbria	U A	Id.	»	Id.	Id.	
	Ultonia	T A	Id.	»	Id.	Id.	
	Slavonia	V A	Id.	»	Id.	Id.	
	Pannonia	N A	Id.	»	Id.	Id.	
	Saxonia	S A	Id.	»	Id.	Id.	
Anchor Line (Glasgow)	*Caledonia*	A T	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Columbia	O T	Id.	»	Id.	Id.	
Allan Line (Liverpool)	*Parisian*	P N	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Tunisian	T N	Id.	»	Id.	Id.	
	Bavarian	B N	Id.	»	Id.	Id.	
	Virginian	G N	Id.	»	Id.	Id.	
	Victorian	»	Id.	»	Id.	Id.	
Isle of Man Steam Packet Co.	*Empress-Queen*	»	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
White Star Line (Liverpool)	[illegible]	[illegible]	Id.	»	Id.	Id.	
	Majestic	M C	Id.	»	Id.	Id.	
	Celtic	L C	Id.	»	Id.	Id.	

White Star Line (Liverpool)	*Baltic*	B C	220-100	»	Marconi.	White Star Line C°.	
	Teutonic	T C	Id.	»	Id.	Id.	
	Majestic	M C	Id.	»	Id.	Id.	
	Celtic	L C	Id.	»	Id.	Id.	
	Oceanic	O C	Id.	»	Id.	Id.	
	Cedric	D C	Id.	»	Id.	Id.	

Allemagne

North German Lloyd	*Kaiser-Wilhelm-der-Grosse*	D K W	»	168-180	Marconi.	North German Lloyd.	
	Kaiser-Wilhelm II.	D K M	»	90-100	Id.	Id.	
	Kronprinz-Wilhelm	D K P	»	Id.	Id.	Id.	
	Bremen	D B R	»	Id.	Telefunken.	Société pour la T. S. F.	
	Grossherzog-von-Oldenburg	»	»	»	Id.	North German Lloyd.	
Hamburg Am. Line	*Deutschland*	D D L	»	100	Marconi.	Hamburg Am. Line.	
	Moltke	D D M	»	Id.	Id.	Id.	
	Blücher	D D B	»	Id.	Id.	Id.	
	Amerika	D D R	»	Id.	Id.	Id.	
	Meteor	D M R	»	»	Telefunken.	Id.	
Hamburg Sud Am. Line	*S. S. Vilano*	»	»	»	Telefunken.	H. S. A. Line.	
	Cap-Ortegal	D C O	»	»	Id.	Id.	Ouvert au serv. public.
	Cap-Blanco	D C B	»	»	Id.	Id.	Id.
	K. Friedrich-August	»	»	»	Id.	Id.	Id.
Kiel-Korsär Line (Sartori and Berger)	*Prinz-Adalbert*	D P A	»	90	Telefunken.	K. K. Line.	Id.
	Prinz-Sigismund	D P S	»	Id.	Id.	Id.	Id.
	Prinz-Waldemar	D P W	»	Id.	Id.	Id.	Id.

1. Extrait des publications officielles du ministère de la marine des États-Unis.

*

COMPAGNIES DE NAVIGATION	NOMS DES NAVIRES	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE de la station radiotélégraphique	OBSERVATIONS
Nordischer Bergungs Line	*Towboat*	»	»	»	»	»	
	Roland	»	»	»	»	»	
Gouvernement	Bateau-pilote *Jade*	J A	350	»	Telefunken.	Gouvernement.	Service officiel.
Belgique							
Gouvernement	*Princesse-Clémentine*	P C	73 (?)	»	Marconi.	Gouvernement.	
	La Flandre	L F	Id.	»	Id.	Id.	
	Princesse-Henriette	P H	Id.	»	Id.	Id.	
	Princesse-Joséphine	P J	Id.	»	Id.	Id.	
	Princesse-Élisabeth	P E	Id.	»	Id.	Id.	
	Léopold II	L D	Id.	»	Id.	Id.	
	Marie-Henriette	M H	Id.	»	Id.	Id.	
	Prince-Albert	P A	Id.	»	Id.	Id.	
	La Rapide	R D	Id.	»	Id.	Id.	
	Ville-de-Douvres	V D	Id.	»	Id.	Id.	
Red Star Line	*Zeeland*	Z D	220-100	»	Id.	Compagnie Marconi.	
	Vaderland	V D	Id.	»	Id.	Id.	
	Finland	F D	Id.	»	Id.	Id.	
	Kroonland	K D	Id.	»	Id.	Id.	

France							
Compagnie générale transatlantique	*Lorraine*	L L	220-100	»	Marconi.	Comp. franç. Marconi.	Ouvert au public.
	Touraine	L T	Id.	»	Id.	Id.	
	Bretagne	L B	Id.	»	Id.	Id.	
	Champagne	L C	Id.	»	Id.	Id.	
	Savoie	L S	Id.	»	Id.	Id.	
	Gascogne	»	Id.	»	Id.	Id.	
	Provence	L P	Id.	»	Id.	Id.	
Hollande							
Holland Am. Line	*Rotterdam*	H R	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Noordam	H A	Id.	»	Id.	Id.	
	Statendam	H S	Id.	»	Id.	Id.	
	Ryndam	H Y	Id.	»	Id.	Id.	
	Potsdam	H N	Id.	»	Id.	Id.	
	Niev-Amsterdam	»	»	»	Id.	Id.	
Hollandische Gesel. Zeeland.	*Doitschland*	»	»	»	»	»	
	Engeland	»	»	»	»	»	
	Neederland	»	»	»	»	»	
	Carpentier	»	»	»	»	»	
Italie							
Navigazione g[le] Italiana	*Sicilia*	»	100-200	200	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Lombardia	A B	Id.	»	Id.	Id.	
	Liguria	A L	Id.	»	Id.	Id.	
	Sardegna	A S	Id.	»	Id.	Id.	
	Umbria	»	Id.	»	Id.	Id.	

COMPAGNIES DE NAVIGATION	NOMS DES NAVIRES	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE de la station radiotélégraphique	OBSERVATIONS
La Veloce Line.	*Citta-di-Napoli*	V C	100-200	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Sud-America	V S	Id.	»	Id.	Id.	
Roumanie							
Roumanie	*Roumanie*.	»	»	200	Branly-Popp	Société maritime.	Service public.

AMÉRIQUE

Canada

Canadian Gov^t S. S. C^o.	*Minto*	»	»	»	Marconi.	»	
	Stanley	»	»	»	Id.	»	
	Canada	»	»	»	Id.	»	
	Montcalm	»	»	»	Id.	»	

États-Unis

Am. Line	*Philadelphia*	P H	220-100	»	Marconi.	Compagnie Marconi.	
	Saint-Paul	S P	Id.	»	Id.	Id.	
	Saint-Louis	S L	Id.	»	Id.	Id.	
	New-York	N K	Id.	»	Id.	Id.	
Atlantic transport Line	*Minneapolis*	M S	Id.	»	Id.	Id.	
	Minnehaha	M A	Id.	»	Id.	Id.	
	Minnetonka	M K	Id.	»	Id.	Id.	
Red « D » Line	*Philadelphia*	D A	300	»	de Forest.	Compagnie de Forest.	
	Caracas	D B	Id.	»	Id.	Id.	
Mallory S. S. Line	*Denver*	A D	Id.	»	Id.	Id.	
	Concho	A C	Id.	»	Id.	Id.	
	San Jacinto	A S	Id.	»	Id.	Id.	
Quebec S. S. C^o	*Bermudian*	B A	Id.	»	Id.	Id.	
	Trinidad	B I	Id.	»	Id.	Id.	

COMPAGNIES DE NAVIGATION	NOMS DES NAVIRES	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE de la station radiotélégraphique	OBSERVATIONS
Ny and Porto Rico S. S. Co.	*Coamo*	C A	300	360	de Forest.	Compagnie de Forest.	
	Ponce	C B	Id.	Id.	Id.	Id.	
Ocean S. S. Co of Savannah Ga.	*City of Columbus*	F A	Id.	Id.	Id.	Id.	
	City of Atlanta	F B	Id.	Id.	Id.	Id.	
	City of Macon	F C	»	»	Id.	»	
	City of Memphis	F D	»	»	Id.	»	
Old Dominion Line.	*Monroe*	M O	»	»	Id.	Compagnie de Forest.	
	Hamilton	H M	»	»	Id.	Id.	
	Jame town	O C	»	»	Id.	»	
	Princess Anne	O B	»	»	Id.	»	
	Jefferson	O D	»	»	Id.	»	
Standard Oil Co	*Lucas*	G B	300	360	Id.	Compagnie de Forest.	
	Maverick	G C	Id.	Id.	Id.	Id.	
	Drake	G D	Id.	Id.	Id.	Id.	
	City of Overett	G F	»	»	Id.	Id.	
	Barge no 91	G M	»	»	Id.	Id.	
	Barge no 94	G N	»	»	Id.	Id.	
	Standard	G O	»	»	Id.	Id.	
	Barge no 95	G P	»	»	Id.	Id.	
	Barge no 92	G R	»	»	Id.	Id.	
	Astral	G S	»	»	Id.	Id.	
B. et O. Line.	*Tug Savage*	H S	300	360	Id.	Id.	
Marine S. S. Co	*Horatio Hall*	J H	Id.	Id.	Id.	Id.	
	North Star	J S	Id.	Id.	Id.	Id.	
P. et O. Nav. Co	*Olivette*	K V	Id.	Id.	Id.	Id.	
	Mascotte	K M	Id.	Id.	Id.	Id.	
Fall River Line.	*Plymouth*	R N	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
	Puritan	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	
	City of Lowell	W E	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	

Fall River Line	*Priscilla*	C A	»	»	Massie.	»	
	Providence	P V	»	»	Id.	»	
	Plymouth	P X	»	»	Id.	»	
	Puritan	R N	»	»	Id.	»	
	City of Lowell	W E	»	»	Id.	»	
	Chester W. Chapin	H N	»	»	Id.	»	
	Pilgrim	G M	»	»	Id.	»	
Panama R. R. Co	*Allianca*	M A	»	»	de Forest.	»	
	Finance	M F	»	»	Id.	»	
	Panama	M H	»	»	Id.	»	
	Advance	M V	»	»	Id.	»	
	Colon	M X	»	»	Id.	»	
Royal Mail Steam Packet Co	*Atrato*	N A	»	»	Id.	»	
	Orinoco	N O	»	»	Id.	»	
	La Plata	N P	»	»	Id.	»	
	Trent	N R	»	»	Id.	»	
	Tagus	N S	»	»	Id.	»	
United Fruit Co	*Ellis*	U A	»	»	Id.	»	
	Prestom	U B	»	400	Id.	»	
Detroit and Cleveland Nav. Co	*City of Detroit*	C D	»	»	Clark.	»	
	Western States	C S	»	»	Id.	»	
J. M. Guffey Petroleum Co	*Larimer*	Q A	»	»	de Forest.	»	
	J. M. Guffey	Q F	»	»	Id.	»	
	Ligonier	Q O	»	»	Id.	»	
	Catania	Q S	»	»	Id.	»	
	S. S. Winifred	Q W	»	»	Id.	»	
	Borgo Shemango	Q C	»	»	Id.	»	
Munson Line	*Prince George*	P G	»	»	Id.	»	
Merchant and Miners Transportation Co	*Gloucester*	R G	»	400	Id.	»	

COMPAGNIES DE NAVIGATION	NOMS DES NAVIRES	LETTRES d'appel	LONGUEUR d'onde	PORTÉE en kilomètres	SYSTÈME	PROPRIÉTAIRE de la station radiotélégraphique	OBSERVATIONS
Ny and Cuba Mail	*Merida*	W M	»	»	de Forest.	»	
Southern Pacific	*Prince-Arthur*	O P	»	»	Id.	»	
	Antilles	K A	»	»	Id.	»	
	Momus	K M	»	»	Id.	»	
	Creole	K R	»	»	Id.	»	
J. G. Bennet'yacht	*Lysistrata*	L A	»	»	Id.	»	
Fisheries C°	*Walter Adams*	»	»	»	»	»	
	Alaska	»	»	»	»	»	
Phila. Pa.	*J. L. Lawrence*	»	»	»	»	»	
	Jos. Wharton	»	»	»	»	»	
	Arizona	»	»	»	»	»	
	Mindora	»	»	»	»	»	
Sun Oil C°	*Toledo*	»	»	»	»	»	
	Paraguay	»	»	»	»	»	

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

CHAPITRE II

CHAPITRE III

CHAPITRE IV

CHAPITRE V

CHAPITRE VI

CHAPITRE VII

CHAPITRE VIII

CHAPITRE IX

CHAPITRE X

ANNEXES

6

Nancy, impr. Berger-Levrault et Cie

